



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**OVLIVŇOVÁNÍ DRSNOSTI POVRCHU
MATERIÁLŮ VYTVOŘENÝCH TECHNIKOU SLM
A VLIV DRSNOSTI NA MAKROSKOPICKÉ
VLASTNOSTI**

INFLUENCING THE SURFACE ROUGHNESS OF MATERIALS CREATED BY
THE SLM TECHNIQUE AND THE INFLUENCE OF ROUGHNESS ON
MACROSCOPIC PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Rotter

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Marek Rotter**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Ovlivňování drsnosti povrchu materiálů vytvořených technikou SLM a vliv drsnosti na makroskopické vlastnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním z problémů techniky SLM je poměrně vysoká drsnost povrchu vytvářených součástí a s tím spojené možné oslabení celého profilu, kdy nerovnosti na povrchu mohou působit jako koncentrátoři napětí.

Navrhovaná bakalářská práce se bude zabývat obecným vlivem drsnosti povrchu kovových materiálů na mechanické vlastnosti a možnostmi, jak modifikovat takovýto drsný povrch tak, aby se zamezilo vzniku defektů.

Cíle bakalářské práce:

Provést literární rešerši vlivu drsnosti SLM materiálů na mechanické vlastnosti a dále možných postupů ovlivňování povrchu 3D výtisků z kovových slitin. V rámci možností provést experimentální ověření především technik umožňujících hromadné zpracování malých dílů.

Seznam doporučené literatury:

MILEWSKI, J. O. Additive Manufacturing of Metals. Cham: Springer International Publishing, 2017, 258. DOI: 10.1007/978-3-319-58205-4. ISBN 978-3-319-58204-7.

YANG, L., K. HSU, B. BAUGHMAN, D. GODFREY, F. MEDINA, M. MENON and S. WIENER. Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production. Cham]: Springer International Publishing, 2017, vii, 168 stran. ISBN 978-3-319-55127-2.

BENEDETTI, M., M. CAZZOLLI, V. FONTANARI and M. LEONI. Fatigue limit of Ti6Al4V alloy produced by Selective Laser Sintering. Procedia Structural Integrity [online]. Elsevier B.V, 2016, 2, 3158-3167 [cit. 2019-09-25]. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.394. ISSN 2452-3216.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Práce shrnuje princip metody SLM a uvádí nejpoužívanější materiály pro tuto technologii a jejich vlastnosti. Pozornost je soustředěna převážně na ovlivňování drsnosti takto vyrobených materiálů, kdy bylo provedeno elektro-chemické leštění v koncentrované kyselině fosforečné s pěti různými nastaveními. Bylo vypořádováno, že vysoká drsnost je způsobena dvěma faktory, přitavenými zrníčky neroztaveného kovového prášku a vrstvenou strukturou. Nejlepším výsledkem bylo leštění při 8 V, 0,5 A a po 40 min, kdy bylo dosaženo vlnitého zahlazeného povrchu, jehož parametr Ra klesl z původních 5,0 μm na 3,9 μm . Byl tak odstraněn jeden z faktorů způsobující vysokou drsnost povrchu.

Klíčová slova

SLM, elektro-chemické leštění, drsnost povrchu, AlSi10

Abstract

Theses resumes the principle of SLM method and submits the most used materials for this technology and its properties. The main issue is influencing the surface roughness of these materials, when the electro-chemical polishing in the concentrated sulfuric acid was used with five difference options. It was observed, that the roughness is caused by two factors, fused nonmelted grains of metal powder and layered structure. Polishing at 8 V, 0,5 A and after 40 min was the best results, when the smooth wave surface was achieved. The Ra parameter descended from initial 5,0 μm to 3,9 μm after this polishing. One of the factors, which causes the high roughness, was eliminated.

Keywords

SLM, electro-chemical polishing, surface roughness, AlSi10

Bibliografická citace

ROTTER, Marek. *Ovlivňování drsnosti povrchu materiálů vytvořených technikou SLM a vliv drsnosti na makroskopické vlastnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing Vít Jan, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Ovlivňování drsnosti povrchu materiálů vytvořených technikou SLM a vliv drsnosti na makroskopické vlastnosti** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování

Chci poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Vítu Janovi za pomoc při tvorbě této práce, předání jeho zkušeností a také za jeho cenný čas. Dále chci poděkovat všem pracovníkům Ústavu materiálových věd a inženýrství za jejich ochotu kdykoli pomoci, rady a podněty, které mně předaly. Děkuji také pracovníkům Ústavu konstruování za poskytnutí vzorků a jejich ochotu. V neposlední řadě také děkuji svým rodičům, kteří mě po celou dobu provázeli a podporovali v mých rozhodnutích.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce.....	2
3	Selective laser melting (SLM).....	3
3.1	Vlastnosti SLM produktů	3
4	Materiály často užívané pro zpracování metodou SLM.....	6
4.1	Oceli.....	6
4.2	Hliníkové slitiny	6
4.3	Titanové slitiny	6
5	Zpracování dílů vyrobených technikou SLM.....	8
5.1	Postupy zpracování ovlivňující vnitřní strukturu/mikrostrukturu	8
5.1.1	Tepelné zpracování	8
5.1.2	Hot Isostatic Pressing (HIP).....	8
5.2	Postupy zpracování upravující drsnost povrchu	10
5.2.1	Mechanické opracování povrchu	10
5.2.2	Chemické leptání a elektro-chemické leštění	10
5.2.3	Ultrazvukové finišování (UCAF).....	12
6	Experimentální část	14
6.1	Pozorovaný materiál	14
6.2	Chemické leptání	15
6.3	Elektro-chemické leštění	15
7	Výsledky experimentů.....	17
7.1	Původní stav	17
7.2	Chemické leptání	17
7.3	Elektro-chemické leštění	19
7.3.1	Vzorek 1 – 10 V, 0,8 A, 10 min	20
7.3.2	Vzorek 2 – 10 V, 0,8 A, 30 min	20
7.3.3	Vzorek 3 – 20 V, 1,5 A, 10 min	21
7.3.4	Vzorek 4 a 5 – 8 V, 0,5 A.....	22
8	Diskuze.....	25
8.1	Porovnání experimentů.....	26
9	Závěr.....	30
10	Literatura	31

11	Seznam použitých zkratek a symbolů	36
12	Seznam obrázků	37
13	Seznam příloh.....	38

1 Úvod

Aditivní výroba (Additive manufacturing – AM) je relativně novým proudem, jakým lze vyrábět materiál. Odvětví začalo vznikat v 80. letech 20. století na universitních půdách a ve vědeckých laboratořích [1]. Tato technologie umožňuje zhotovit součástky se složitou geometrií a komplikovanými vnitřními dutinami, které jsou nevyrobitelné za pomoci konvenčních postupů. AM tak umožňuje konstruktérům zcela nový náhled při navrhování nových dílů.

Tato práce se zabývá především úpravou povrchu vzorků, které byly vyrobeny jednou z metod AM. Pro kovové materiály je nejpoužívanější metodou tavení pomocí laseru (Selective Laser Melting – SLM). Důvod, proč je dobré se touto problematikou zabývat, je následující. U většiny součástí je dosaženo vysoké drsnosti povrchu. Takový povrch oslabuje celou součástku, jelikož nerovnosti působí jako dobré koncentrátoři napětí a společně s materiálem, který není příliš houževnatý, ovlivňuje negativně zejména únavovou životnost [10]. V drsném povrchu se také snáze zadržuje voda a nečistoty, které urychlují degradaci materiálu. Samozřejmě záleží i na vlastnostech daného materiálu a na budoucím využití součástky, jelikož ne ve všech aplikacích požadujeme co nejhladší povrch.

Úvahy se sice odklání od původní koncepce aditivní výroby, tj. pouze zhotovit 3D model v CAD systému a následně jej vytisknout a mít tak dokončen celý proces výroby dílu, ale na druhé straně určité aplikace vyžadují vyšší nároky. Důvodem ke změně smýšlení a přístupu k AM může například také být práce s vytvrditelnými slitinami, u kterých by bylo neuvážené, kdyby jsme se rozhodli je ponechat v nerovnovážném stavu a neumožnit jim získání veškerých vlastností, pro které byly vyvinuty.

2 Cíle práce

Provést literární rešerši vlivu drsnosti SLM materiálů na mechanické vlastnosti a dále možných postupů ovlivňování povrchu 3D výtisků z kovových slitin. V rámci možností provést experimentální ověření především technik umožňujících hromadné zpracování malých dílů.

3 Selective laser melting (SLM)

Selective Laser Melting (SLM) je celosvětové označení pro aditivní výrobu (anglicky: Additive manufacturing – AM) pomocí laserového tavení. Výhodou této a dalších aditivních metod je oproti konvenčním způsobům velká časová úspora a zhotovení produktů složitých tvarů a komplikovaných vnitřních dutin, které by nebylo možné zhotovit za pomoci běžných postupů. Díky těmto kladům se usiluje o vývoj AM tak, aby byla tato technologie konkurenceschopná s konvenčními technologiemi. Bohužel je tento postup výroby velmi drahý, jelikož cena výsledné součásti je ovlivněna mimo jiné postprocessingovými a povrchovými úpravami, které jsou nutné k dosažení provozuschopnosti výrobku o požadovaných vlastnostech [1, 2, 3].

Samotný proces SLM spočívá v postupném nanášení prášku na základovou desku o rozměrech 50 mm x 50 mm nebo dokonce až 800 mm x 400 mm a následným přetavením [převzato z 5 – zdroj 5]. Tloušťka jedné vrstvy se pohybuje od 20 μm až do 100 μm [4]. Celý proces výroby se odehrává v komoře naplněné ochranným (inertním) plynem, který chrání materiál před interakcí s přirozeným okolím (zejména kyslíkem) a nepokrývá se tak nežádoucími sloučeninami (oxidy). Obsah zbytkového kyslíku v komoře pro SLM proces je menší než 0,1 % [6]. Do výrobní komory je dodáván ochranný plyn nepřetržitě a tak proudění vzniklé jeho výměnou slouží k odstranění par a šplíhanců vzniklých během tavby [1, 7].

Nevýhodou je, že součástky musí obsahovat konstrukci podpor, které slouží ke stabilitě komponenty během výrobního procesu, ale také k zabránění dodatečných deformací produktu při tuhnutí vlivem zbytkových napětí [8]. Tyto podpory musí být odstraněny v některé dokončující operaci, což může být někdy náročné, neboť podpory jsou vyrobeny z téhož materiálu, jako je výrobek sám [1]. Tato operace prodlužuje výrobní čas a tak se snaží být optimalizována na co nejkratší dobu. Ke snížení zbytkových napětí slouží také předeheřtí základové desky na teplotu mezi 200 – 500 °C, což vede ke snížení teplotního gradientu [9].

3.1 Vlastnosti SLM produktů

Při využívání SLM technologie je užito velké množství poznatků z tradičních postupů. Naproti tomu však jsou přítomny skutečnosti, které jsou zcela nové či neočekávané a je třeba jich odstranit nebo alespoň eliminovat. Konečná podoba výrobního procesu proto silně závisí na budoucí činnosti výrobku.

Mechanické vlastnosti výrobku jsou vysoce závislé na procesu tvorby jednotlivých vrstev (jestli byli nataveny na správnou teplotu, jak rychle byli schlazeni, správné nastavení vlastností laseru, rychlost pohybu laseru apod.). V globálu se dá ale říci, že tyto materiály obsahují různé druhy vad a nečisto, což má negativní vliv zejména na únavový život. Na toto chování mají podíl i jednotlivé vrstvy, který tvoří hrubý povrch, jenž je bohatý na koncentrátoři napětí [1].

Výhodou komponent zhotovených SLM metodou je vysoká mez pevnosti i kluzu díky dosažené jemnozrnné mikrostruktury, která vznikla po prudkém ochlazení nataveného materiálu. Na druhé straně je nutné provést tepelnou úpravu pro změnu této mikrostruktury nebo alespoň pro odstranění zbytkových napětí [26].

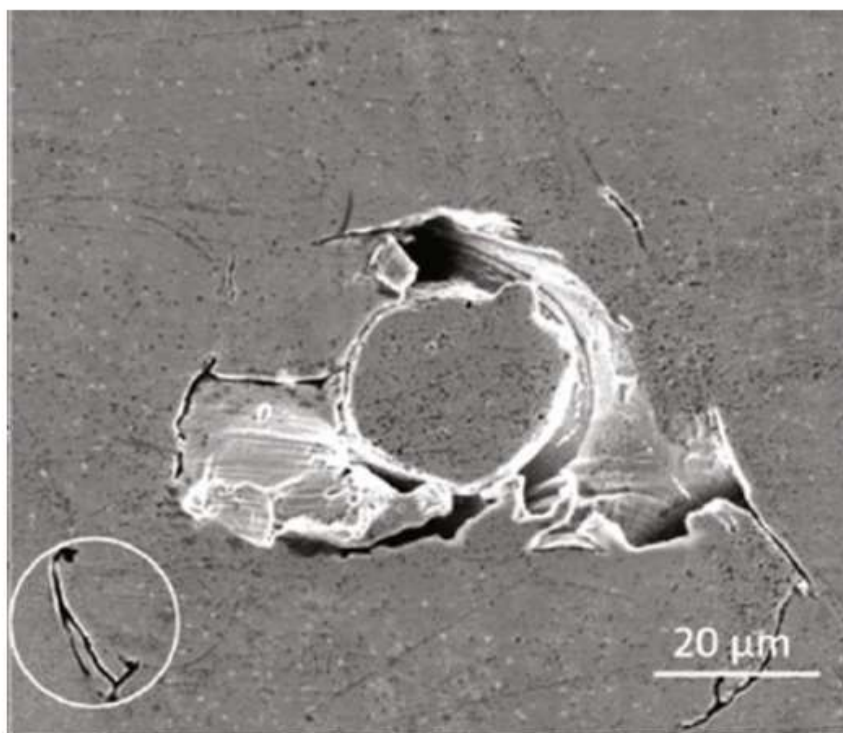
Tepelná vodivost materiálu je při tvorbě součásti pomocí SLM také důležitým aspektem, neboť energie přivedená na povrch, která je zodpovědná za natavení, musí být absorbována a je pak dále rozváděna. Problémem je, že se vždy jedná o malé oblasti, které jsou velmi rychle ohřáty a následně vysokou rychlostí ochlazovány. Tento efekt způsobí, že ve stejný čas je materiál ohřátý i chladný a díky změně objemu dochází k deformaci výrobku. Dalším důsledkem této rapidní změny je přítomnost zbytkových napětí, které mají negativní vliv na mechanické vlastnosti. Rychlý odvod tepla také ovlivňuje vzhled mikrostruktury [1].

Produkty také vykazují vysokou anizotropii. Toto chování odráží samotnou podstatu výroby (tavení po vrstvách). Je proto velmi důležité zvážit, jak bude součástka zatěžována a vhodně zvolit rozvrstvení materiálu.

Povrch SLM materiálů je zpravidla velmi hrubý díky rozvrstvení a nečistotám, které ulpěly na povrchu při výrobě. Mezi nejčastější nečistoty na povrchu patří zatuhlé kulovité šplíchance, které zde byly vystříknuty z roztaveného materiálu díky silným dynamickým procesům odehrávající se při výrobě [1]. Tyto kulovité nečistoty jsou velmi porézní a na povrchu je možné také pozorovat intermetalické fáze (záleží na druhu slitiny), které zde vznikly díky segregaci při tuhnutí [11, 12].

Hojně vyskytujícím se defektem jsou ne zcela roztavená zrníčka kovového prášku, které se mohou vyskytovat jak na povrchu, ale zároveň mohou být uvězněny uvnitř objemu. Ty jsou velké zhruba jako výchozí kovové zrníčko, tj. mnohem menší než šplíchance. Také nevykazují porozitu a jsou tak mnohem kompaktnější [1, 13].

Možným typem neroztaveného prášku je také zrníčko pokryté oxidem či tenkým filmem. Při špatném nastavení hustoty energie tavicího média může také dojít k natavení (propálení) předchozí vrstvy [1].

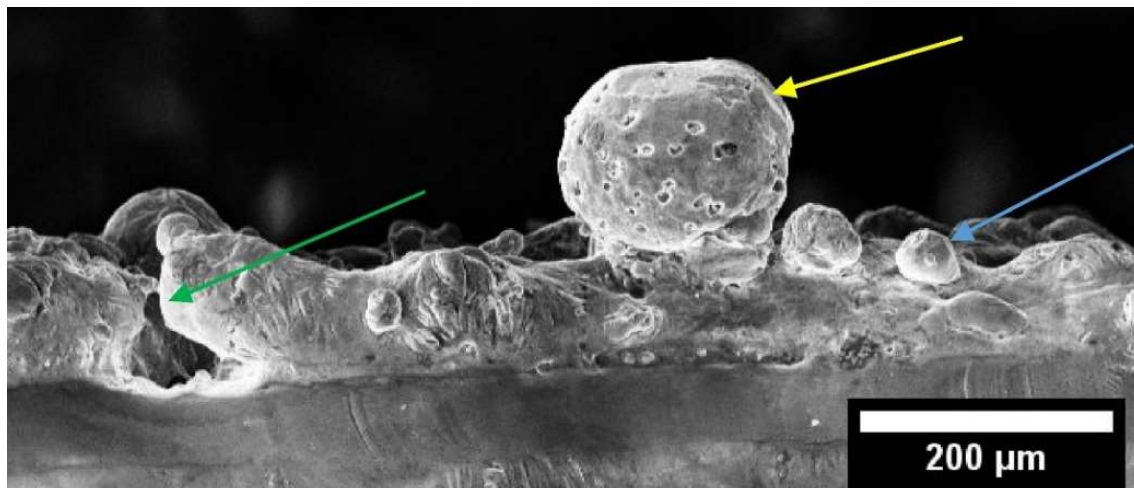


Obrázek 1: Neroztavené zrníčko kovového prášku uvnitř materiálu [převzato z 1 – zdroj 5].

Dalším úkazem, který je možné sledovat na povrchu je takzvaný „balling“. Tato vada má kulovitý protáhlý tvar. Je způsobena nedostatečnou smáčivostí nataveného materiálu a také příliš velkou rychlostí laserového paprsku. Možným způsobem, jak tuto vadu odstranit je dostatečné natavení prášku. To může být docíleno snížením rychlosti pohybu laseru společně se snížením jeho výkonu, aby naopak nedocházelo k propálení mezi jednotlivými vrstvami [1, 13].

Častou vadou struktury je také porosita, která má kulovitý tvar a je zapříčiněna uvězněným plynem (vodíkem) během tavení a následným zatuhnutím. Další zdroj pórů je užití výchozího materiálu, který obsahuje bublinky plynu nebo vody, která může být přítomná i v nedobře vysušeném kovovém prášku. Vysoká porosita má za následek snížení pevnosti materiálu, ale zakulacené póry nepůsobí jako koncentrátoři napětí či nejsou zónami pro iniciaci

trhliny. Povrchové póry jsou pak vhodným místem pro nahromadění vody a tím urychlí proces koroze. Je nutné však podotknout, že u některých aplikací, jako jsou například filtry či síta, je porosita nezbytným a chtěným jevem. Další výhodou přítomnosti pórů u některých aplikací, jako jsou například konstrukce tlumící rázy nebo v medicíně, je výsledná nižší hmotnost a schopnost pohlcování energie [1, 14, 15, 16].



Obrázek 2: Snímek z povrchu SLM vzorku - balling (zelená šipka), šplíchanec (žlutá šipka), neroztavené zrníčko kovového prášku (modrá šipka) [13].

4 Materiály často užívané pro zpracování metodou SLM

Pomocí metody SLM můžeme zhotovit takřka libovolný kovový materiál. Na druhé straně vezmeme-li do úvahy náročnost celého procesu a finanční zátěž na výrobu, má smysl používat jen ty slitiny, které jsou zajímavé z hlediska mechanických, chemických a fyzikálních vlastností. Ty totiž můžeme použít v náročných aplikacích napříč všemi odvětvími [1]. Příkladem mohou být niklové superslitiny, jako je Inconel 625, který je užit ve vysokoteplotním prostředí [40] nebo také Invar 36, u kterého byl zjištěn velmi nízký součinitel teplotní roztažnosti [41]. Také jsou hojně zkoumány materiály, které vykazují biokompatibilitu [15, 16, 27, 38, 42], jelikož lékařské implantáty jsou velmi zatěžovány a jedná se o tvarově komplikované prvky.

4.1 Oceli

Ocel je jedním z nejvíce užívaných materiálů. Díky širokému spektru různých druhů je tento materiál samozřejmě zajímavý i pro výrobu pomocí SLM. Jedná se zejména o austenitické nerezové ocele [28], precipitačně vytvrditelné nerezové ocele [29], nástrojové ocele [28, 30] a maraging ocele [31].

Vysoký teplotní gradient u SLM technologie a železité slitiny nám umožňují díky alotropickým modifikacím železa dosáhnout různorodé struktury. Na druhé straně slitiny, které tvoří různé struktury v závislosti na rychlosti ochlazování, jsou velmi citlivé na nastavení parametrů SLM a musí být bedlivě pozorovány v průběhu výroby [32, 33].

4.2 Hliníkové slitiny

Hliník je hojně se vyskytujícím prvkem v zemské kůře. Je proto levný a má také širokou škálu využití. Naproti tomu valná většina hliníkových slitin není nějak zvlášť vyráběna pomocí SLM. Důvodem je jejich obtížná svařitelnost. Další nevýhodou je, že většina hliníkových slitin dosáhne dané tvrdosti až po vytvrzení, což je trochu v rozporu s AM (rychlá a snadná výroba). Některé vytvrditelné slitiny také obsahují nestálé prvky jako je zinek, který například zvyšuje porositu [8, 34]. Hliník je velmi lesklý, a tak dobře odráží i laserový paprsek, což způsobuje značné potíže [34]. Velikou výhodou je však tepelná vodivost hliníku, díky které je materiál rychleji a lépe ochlazován a je tak redukováno zbytkové napětí. Díky dobré tepelné vodivosti je také možno použít vyšší stavěcí rychlost a není potřeba velkého množství podpor [8].

Komerčně užívané hliníkové slitiny zhotovené pomocí SLM nejsou prakticky žádné [8]. Nicméně byly vyvinuty dvě slitiny speciálně určené pro tuto výrobu a to AlSi12 a AlSi10Mg, jenž nevykazovaly žádnou křehkou oxidyckou vrstvu a jsou tak vhodné pro vrstvený materiál [35]. Mezi komerčně užívané slitiny, které by mohly být po dalším výzkumu užity k SLM výrobě patří slitiny AlCu, u kterých však velmi závisí na zvoleném množství mědi, jelikož některé slitiny mohou být náchylné k prasklinám [35].

4.3 Titanové slitiny

Titanové slitiny jsou velmi odolné v extrémních prostředích, zejména jsou stále i za vyšších teplot. Tyto slitiny jsou v porovnání s hliníkovými daleko vhodnější pro SLM výrobu, jelikož konvenční výroba zahrnuje i obrábění a titan jde velmi obtížně obrábět. Navíc díky alotropickým modifikacím titanu a vysokému teplotnímu gradientu při SLM získáváme vhodné struktury [8].

Tyto výhody zajistily titanovým slitinám jako je například Ti6Al4V své místo i v komerční výrobě [8, 10, 36, 37, 43]. Dalšími zkoumanými slitinami je slitina Ti24Nb4Zr8Sn

[38], která je vhodná pro lékařské aplikace, nebo slitina $\text{Ti6,5Al3,5Mo1,5Zr0,3Si}$ [39], která je využívána v kosmickém průmyslu.



Obrázek 3: Turbinová lopatka z SLM niklové slitiny CM247 [50].



Obrázek 4: Topologicky upravený držák z SLM hliníkové slitiny [51].

5 Zpracování dílů vyrobených technikou SLM

Dokončovací operace jako je tepelné a chemickotepelné zpracování, broušení, leštění apod. není příliš často v AM odvětví užíváno. Důvodem je nárůst výrobního času, ale především ceny, která je již tak vysoká. Nicméně jak potvrzují některé výzkumy, např. studie H. Attara a kol. [6], B. Ferrariho a kol. [7] nebo práce M. Benedettiho a kol. [10], v určitých aplikacích je struktura a stav povrchu po SLM nedostačující.

5.1 Postupy zpracování ovlivňující vnitřní strukturu/mikrostrukturu

Ovlivňování vnitřní struktury SLM dílů není nějak zvlášť odlišné oproti dílům vyráběných konvenčním způsobem. Výchozí strukturou u SLM dílů je zpravidla podobná martenzitické struktura, která zde vznikla po prudkém ochlazení. Zpracování tak často ovlivňuje tuto velmi křehkou strukturu, nebo v případě vytvrditelných slitin umožňuje vznik precipitátů.

5.1.1 Tepelné zpracování

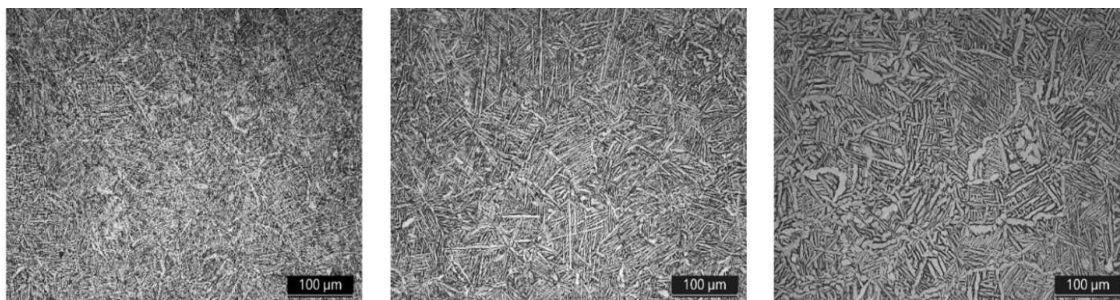
Jak při konvenční výrobě, tak i u SLM dílů jsou dělány běžné tepelné úpravy, které se dají taktéž nazvat žíhání. Volba teplot závisí na požadovaných vlastnostech výrobku, ale u této úpravy se jedná pouze o změnu mikrostruktury, snížení množství pórů nebo umožnění precipitace u vytvrditelných slitin a výsledný efekt nemá vliv na drsnost povrchu. Tepelné úpravy jsou prováděny mezi teplotami od 650 °C – 1150 °C a časová náročnost je 2 – 4 hodiny [převzato z 8 – zdroj 127]. Provádí se v pecích, které obsahují inertní plyn, jako je např. argon nebo ve vakuu [8, 10].

Pozorování změny mikrostruktury a změny mechanických vlastností titanové slitiny při různých žíhacích teplotách bylo provedeno vědkyní Sheydovou a kolektivem [převzato z 8 – zdroj 127]. Například při teplotě 700 °C došlo pouze ke snížení vnitřního pnutí. Naopak při působení teploty 1010 °C proběhla celková změna mikrostruktury vzorku. Jak se dá očekávat, vzorek, jenž prodělal žíhání ke snížení pnutí, obsahoval velmi podobnou mikrostrukturu, jako nežíhaný a měl také podobné mechanické vlastnosti. Při použití vysoké teploty, však došlo ke kompletní překrystalizaci a původní martenzitická struktura byla nahrazena eutektoidní. Tento proces také zahrnoval zhrubnutí zrna a výsledkem byly nižší pevnostní vlastnosti, ale na druhé straně v mikrostruktuře nebyla patrná vrstvená struktura.

5.1.2 Hot Isostatic Pressing (HIP)

Hot isostatic pressing (HIP) je metoda úpravy povrchu, které je používána za účelem zhutnění výrobku. Tento proces se skládá z ohřevu součásti na požadovanou teplotu, která je nižší než teplota tání, a následně se plasticky deformuje [23, 24, 25].

Italská studie Benedettiho a kolektivu [10] uvedla srovnání vzorků ze slitiny Ti6Al4V, přičemž jeden ze vzorků byl podroben HIP úpravě. Byla provedená tahová únavová zkouška (dále jen únavová zkouška), jenž užívala speciální geometrii, která umocnila přítomnost pórů a povrchových vrubů. Před samotným HIP-ováním bylo provedeno žíhání ke snížení vnitřního pnutí při teplotě 650 °C po dobu 5 hodin, finišování a leštění pro rovnoměrnou výchozí strukturu a povrch. Bylo také provedeno naleptání za účelem zviditelnění mikrostruktury. Důležitým parametrem HIP je teplota, při které probíhá. Volbou teploty totiž můžeme způsobit změnu vnitřní mikrostruktury, jelikož za daných podmínek nebude výchozí stav stabilní.



Obrázek 3: Změna mikrostruktury v závislosti na teplotě HIPování - zleva 900 °C, 920°C a 950 °C [10].

Tabulka 1: Parametry HIP podle Benedetti, M., Cazzoli, M. a Leoni, M. [10]

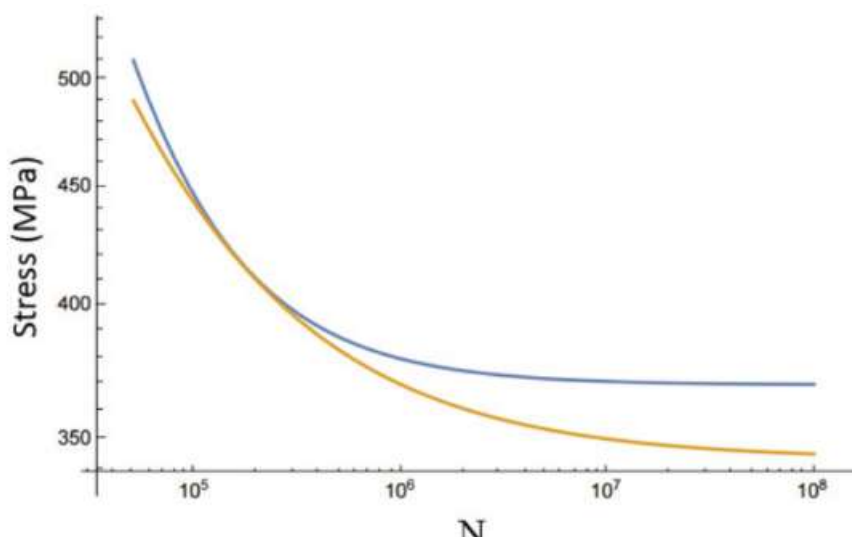
Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Čas [hod]
920	100	2

Mimo únavovou zkoušku byla provedena také klasická tahová zkouška, která vyjevila nepatrné rozdíly v napětíových charakteristikách. Hodnota meze pevnosti poklesla z 1092 MPa na 962 MPa a hodnota meze kluzu z 1022 MPa na necelých 895 MPa. Naproti tomu deformační charakteristiky byly o 6% lepší u HIPovaného vzorku [10].

Závěrem z únavových zkoušek však bylo potvrzení nízké únavové životnosti u obou vzorků, přičemž u neHIPovaného vzorku byla stanovena mez únavy na 325 MPa, kdy součást vydržela 50 miliónů cyklů. Vzorek s HIP úpravou byl rozdělen do dvou skupin:

- Při zátěži vyšší jak 400 MPa nebylo dosaženo ani 1 milionu cyklů.
- Při zátěži nižší jak 400 MPa měl vzorek takřka neomezenou životnost.

Z tohoto závěru byla vyvozena mez únavy pro HIPovaný vzorek na 350 MPa [10].



Obrázek 4: Porovnání výsledků z únavové zkoušky HIPovaného (modrý graf) vzorku a neHIPovaného (oranžový graf) vzorku [10].

Drobné rozdíly ve vlastnostech a chování byly způsobeny díky změně mikrostruktury u HIPovaného vzorku, jelikož zde byl pozorován výskyt většího množství měkčí β – fáze, která je oproti martenzitické struktuře stabilnější. Díky vyšší houževnatosti HIPovaný vzorek lépe

odolává únavovému poškození a prodlužuje tak životnost vzorku. Nutné dodat, že při měření drsnosti povrchu obou vzorků bylo dosaženo přibližně stejných hodnot ($R_a = 5$), takže HIP úprava neměla velký vliv na drsnost povrchu. Tato skutečnost má za následek iniciaci trhlin při únavové zkoušce vždy na povrchu vzorku, kde je hojnost koncentrátorů napětí [10].

5.2 Postupy zpracování upravující drsnost povrchu

Jak bylo již zmíněno, kovové součásti zhotovené pomocí SLM mají nevhodnou povrchovou strukturu. Pro konkurence schopné postavení SLM komponent ve srovnání s konvenčními metodami je důležité tyto povrchy vhodně upravovat. V dnešní době existuje jen malé množství dokončujících operací, které zlepšují stav povrchu, avšak jejich využití je omezené a mnohdy nedostačující.

5.2.1 Mechanické opracování povrchu

Jedním z nejběžnějších způsobů snížení drsnosti je pomocí broušení. To však díky geometricky složitým dílům není až tak často využíváno a upřednostňují se různé abrazivní metody. Takovým příkladem je například pískování či balotínování, jak uvádí Bagherifard a kol. [48], kdy pískováním byla snížena hodnota parametru R_a téměř o polovinu. U abrazivního obrábění však mohou nastat problémy při opracování vnitřních dutin, jelikož si nemůžeme být jisti, zdali je zajištěn dobrý přísun částic do těchto prostor.

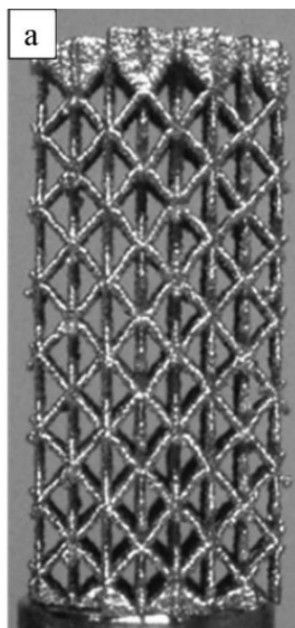
Zajímavým způsobem redukce drsnosti povrchu je kombinace mechanického a elektro-chemického leštění podle Zhaoa a kol. [49], kteří se zabývali snížením drsnosti děr. Tato metoda využívá speciální anodu, která je opatřena kartáčky, jenž zajišťují mechanické odnímání materiálu.

5.2.2 Chemické leptání a elektro-chemické leštění

Možným způsobem, jak efektivně snížit drsnost povrchu, je použití chemický procesů a reakcí. Mezi tyto metody patří chemické leptání či elektro-chemické leštění. Obě metody fungují na stejném základní principu, kdy je využito silných kyselin, které naruší povrch a pomocí mechanického pohybu je oddělený materiál odplavován z povrchu pryč, kdežto v pórech se usadí ochranný film, který neumožní další naleptání okolí [17].

U chemického leptání jsou nejčastějšími rozpouštědly roztoky kyseliny sírové (H_2SO_4), kyseliny fluorovodíkové (HF) nebo kyseliny dusičné (HNO_3) [14]. Elektro-chemické leštění pak využívá elektrolyty, jenž jsou tvořeny kyselinou sírovou (H_2SO_4) společně s kyselinou fosforečnou (H_3PO_4) nebo kyselinou chloristé ($HClO_4$) [18]. Po skončení operace je nutné vzorek opláchnout ve vodě a etanolu a poté ho je třeba usušit. V případě elektro-chemického leštění závisí výsledná drsnost na době, zvolenému napětí a na vhodné proudové hustě, jakou elektrolýza probíhá [14].

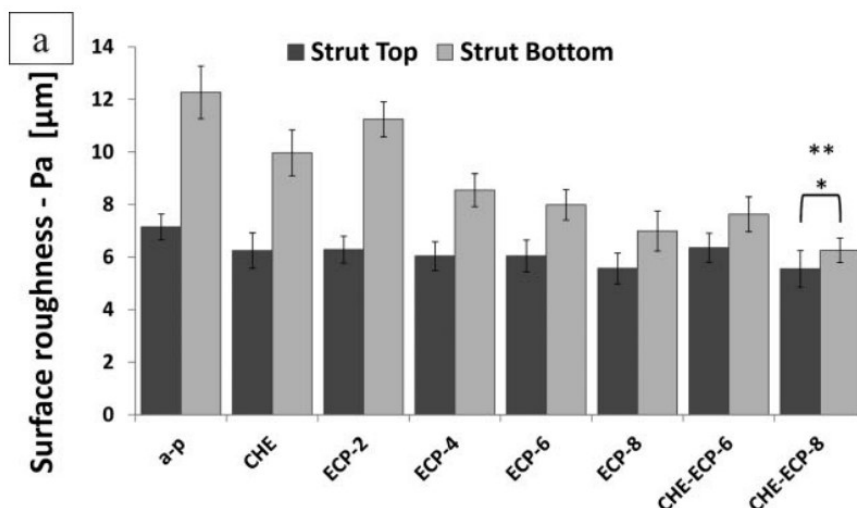
Tým pod vedením prof. Pyky a Dr. Burawského uvedl v časopise *Advanced engineering materials* [14] závěry práce, jenž se zabývala změnou drsnosti vzorku s tzv. mikroprutovou strukturou (Obrázek 7) (materiál: Ti6Al4V, zhotovený pomocí SLM) vlivem různého nastavení (viz. výše). Pro zvolený materiál bylo nejefektivnější využití kyseliny fluorovodíkové (HF). V případě chemického leptání šlo o roztok se složením (0,5 ml) HF + (50 g) H_2O . V průběhu procesu došlo k odstranění nečistot z povrchu díky přerušení slabých vazeb mezi zrníčkem nečistoty a povrchem.



Obrázek 5: Vzorek s mikroprutovou strukturou (zvětšený) [14].

Sestava pro elektro-chemické leštění se skládala z platinové nádoby, která byla zapojena jako katoda (-), vzorku, zapojeného jako anoda (+) a elektrolytu, jenž obsahoval 55 ml kyseliny octové (CH_3COOH), 30 ml kyseliny sírové (H_2SO_4) a 15 ml kyseliny fluorovodíkové (HF). Do soustavy byl přiveden zdroj stejnosměrného napětí (30 V, 2 A) s proudovou hustotou $1,2 \text{ mA} \cdot \text{mm}^{-2}$. Změna drsnosti byla postupně pozorována po 2, 4, 6 a 8 min. Rovněž byly pozorovány vzorky, jenž prodělali jak chemické leptání, tak i elektro-chemické leštění a to po dobu 6 a 8 min [14].

Výsledkem bylo zjištění, že u elektro-chemického leštění s delším časem bylo dosaženo nižší drsnosti, ale ani po 8 min nebyla získána požadovaná drsnost. Tu by bylo teoreticky možné obdržet po delším časovém úseku, ale došlo by k výraznému ztenčení „prutů“ vzorku. Drsnost po chemickém leptání dosahovala zhruba stejných hodnot, jako elektro-chemickém leštění po 2 min. Nejeefektivnější metodou se ukázala kombinace obou metod při 8 minutové elektrolýze [14].



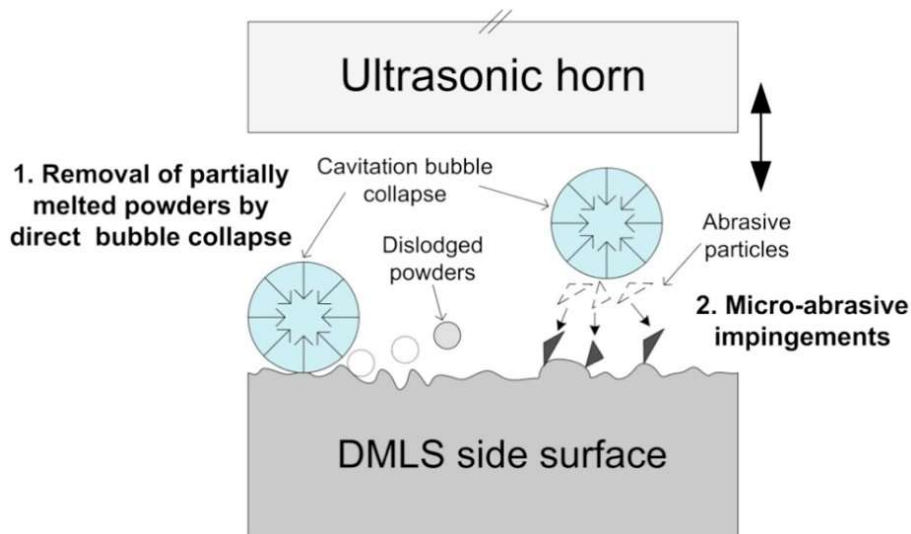
Obrázek 6: Naměřená drsnost povrchu (a-p = vzorek bez úpravy, CHE = chemické leptání, ECP – X = elektrochemické leštění po X minutách, Strut top/bottom = pruty vzorku vnější/vnitřní) [14].

5.2.3 Ultrazvukové finišování (UCAF)

Dalším zajímavým způsobem snížení drsnosti povrchu je za pomoci ultrazvuku. Tento postup vychází z technologie obrábění ultrazvukem, avšak je použito jiných parametrů a nastavení. Metoda byla vyvinuta v Rolls-Royce laboratoři v Singapuru Tanem K. L. a Yeoem S. H. [19] a je nazývána anglickou zkratkou UCAF (Ultrasonic Cavitation Abrasive Finishing). Pozorována byla kostka o rozměrech 20 mm x 20 mm x 20 mm z Inconelu 625, který byl vyroben pomocí DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Vzorek byl následně vyžehán při teplotě 650 °C po dobu jedné hodiny a nakonec očištěn působením ultrazvuku (15 min).

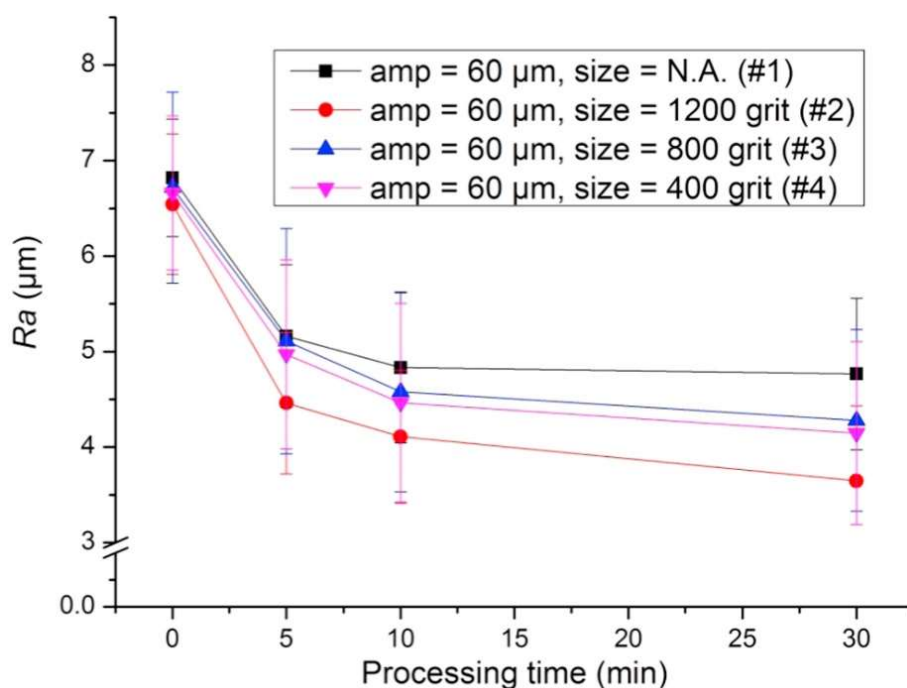
Zařízení pracuje díky ultrazvukovému generátoru, který je schopen přes tzv. roh produkovat zvukové vlny o frekvenci 20 kHz, přičemž amplituda kmitu rohu dosahuje pouze 60 μm. Roh je společně se zkoumaným vzorkem ponořený v abrazivní břečce složené z částic karbidu křemíku o velikosti 5,5 μm a deionizované vodě. Finišování probíhalo po dobu 30 min [19].

Snížení drsnosti povrchu je dosaženo díky dvěma mechanismům. Jak název metody napovídá, jedná se o kavitaci a abrazi. Kavity vznikají v nejrůznějších skulinách a prasklinách. Postupně se zvětšují a při jejich zániku vznikne velmi silný tlakový paprsek, jenž je schopen odstranit ne zcela roztavené zrníčko kovu z povrchu. Tento mechanismus, jak bylo vypořádováno, je nejdominantnější v prvních 5 minutách finišování, kdy povrch obsahuje dostatek iniciačních míst. Po odstranění nečistoty na jejím místě vznikne malý kráter, který je vhodným iniciačním místem při lomu. Ten je však schopen zahladit druhý mechanismus, abraze. Díky vysoké rychlosti rázové vlny se mikročástice pohybují po povrchu a zahlazují jakékoliv malé výběžky či krátery [19, 20, 21, 22].



Obrázek 9: Schéma metody UCAF [19].

Výsledkem bylo velmi uspokojivé snížení drsnosti povrchu. U výchozího vzorku se hodnota R_a pohybovala okolo $7\text{ }\mu\text{m}$. Po aplikování výše uvedených nastavení UCAF (výsledek je ovlivněn velikostí abrazivních částic, délkou trvání procesu a frekvencí) byl naměřený parametr R_a roven $3,65\text{ }\mu\text{m}$, což představuje téměř 45% snížení drsnosti [19].



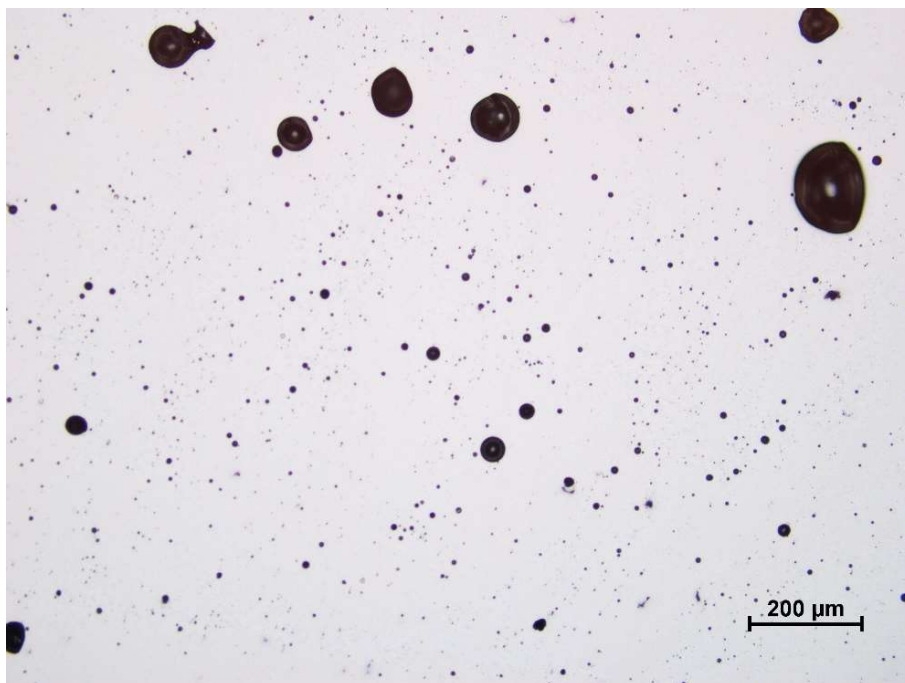
Obrázek 10: Snížení drsnosti v závislosti na čase - Černý graf = UCAF bez mikroabrazivních částic, Růžový graf = UCAF s mikroabrazivními částicemi SiC velikosti $22,5\text{ }\mu\text{m}$, Modrý graf = UCAF s mikroabrazivními částicemi SiC velikosti $12\text{ }\mu\text{m}$ a Červený graf = UCAF s mikroabrazivními částicemi SiC velikosti $5,5\text{ }\mu\text{m}$ [19].

6 Experimentální část

6.1 Pozorovaný materiál

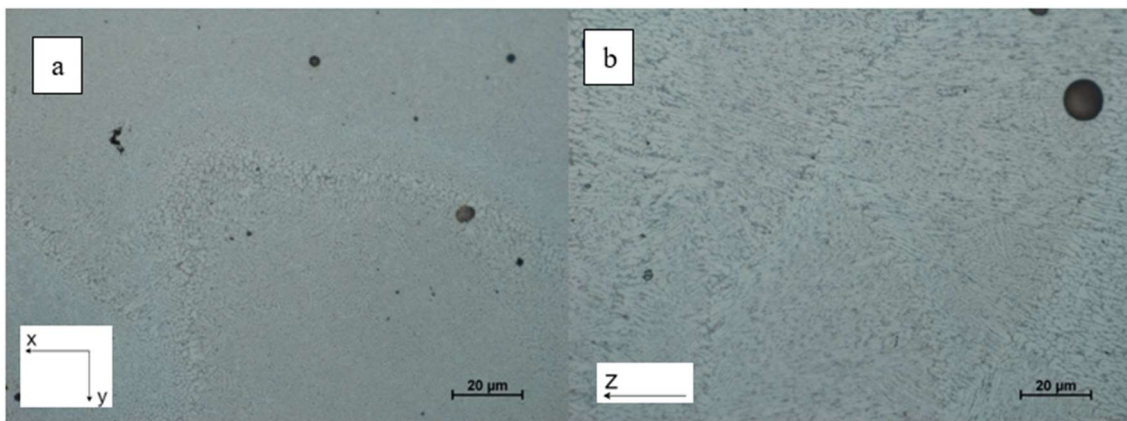
Praktická část se bude zabývat snížením drsnosti povrchu siluminu, který má téměř eutektické složení (konkrétně AlSi10). Vzorky o velikosti 10x20x2 mm byly vyrobeny pomocí SLM technologie na stroji SLM Solutions GmbH (Příloha 1).

Jeden ze vzorků byl rozřezán na laboratorní řezačce ATA Brillant 220 (Příloha 2) v podélném a příčném směru, aby bylo možné pozorovat mikrostrukturu daného materiálu přes světelný mikroskop OLYMPUS GX51 (Příloha 3). Obrázek 11 zachycuje strukturu ve stavu po leštění bez leptání, kde je možné vidět velké množství pórů, které pravděpodobně vznikly díky vysoké energii laseru, nebo odpařováním vody z mírně vlhkého prášku při výrobě, což je ale méně pravděpodobné, jelikož prášek byl sušen silikagelem a následně dosušen v troubě zhruba při 60 °C.



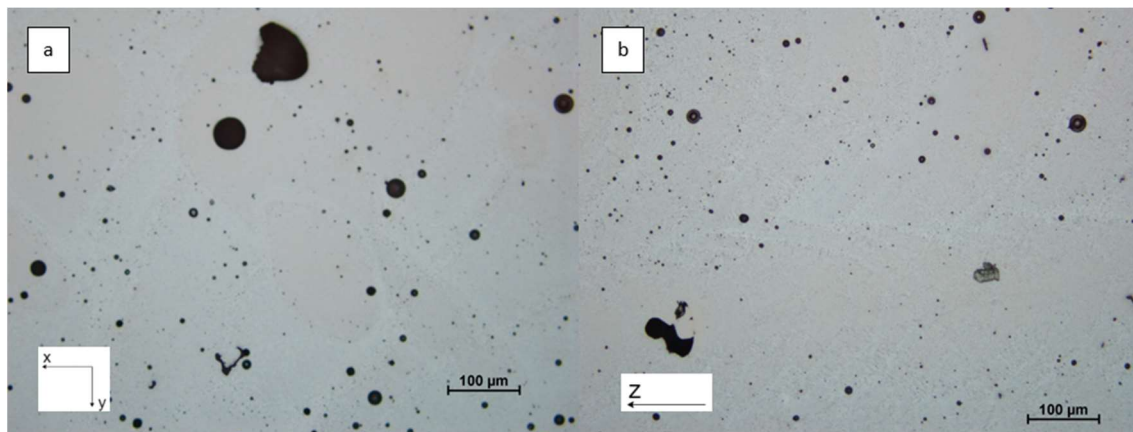
Obrázek 11: Mikrostruktura SLM AlSi10, neleptaný stav.

Pro lepší zviditelnění mikrostruktury (Obrázek 12) byl vzorek leptán „Kellerem“ (složení v obj. %: 1,0 % HF, 2,5 % HNO₃, 1,5 % HCl, 95,0 % destilovaná H₂O). Zde je možné pozorovat velmi jemnou mikrostrukturu, která vznikla díky dynamickému ochlazení během stavby.



Obrázek 12: Mikrostruktura SLM AlSi10, leptaný stav; vodorovný řez (a), svislý řez - směr stavby (b).

Je také možné pozorovat odlišnou velikost zrn ve vodorovném a svislém směru. Ve svislém směru (směr stavby, Obrázek 12b) jsou jednotlivá zrna větší a protáhlá ve směru stavby, jelikož v tomto směru je již ztuhlá vrstva znovu přetavena a zrna tak krystalizují do tohoto směru díky nižšímu teplotnímu gradientu. Shluky zrn jsou pak uspořádány do půlkruhů, tzv. meltpoolů, které jsou relativně dobře pozorovatelné při menším zvětšení.



Obrázek 13: Mikrostruktura SLM AlSi10, leptaný stav; vodorovný řez (a), svislý řez s „meltpooly“ (b).

6.2 Chemické leptání

Jako první úprava pro snížení drsnosti bylo užito chemického leptání podle Jindrové [44]. Zde byl vzorek vložen do směsi koncentrované H_3PO_4 a koncentrované HNO_3 v poměru 85:15. Směs byla zahřáta na 80°C . Doba chemického leptání však byla zvýšena z 5 min na 30 min pro dosažení většího úběru materiálu. Po dokončení leptání byl vzorek očištěn v ultrazvukové čističce, aby z povrchu byly odstraněny zbytky odleštěného materiálu.

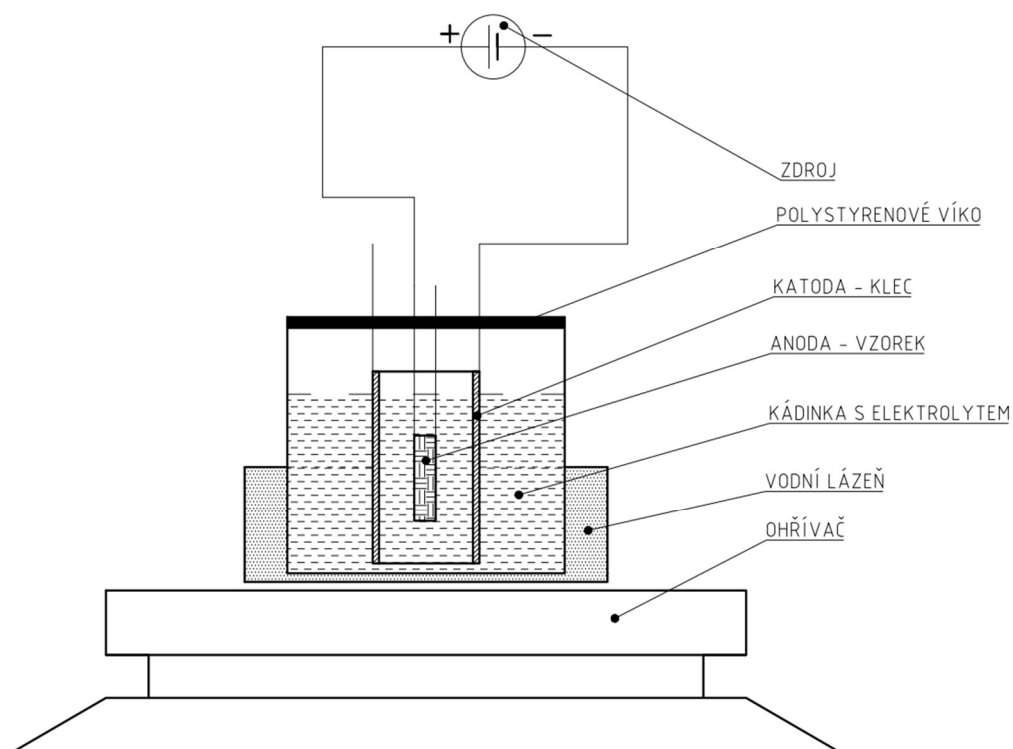
6.3 Elektro-chemické leštění

Další možnou úpravou povrchu je elektro-chemické leštění. Jelikož nebyl nalezen žádný přesný návod pro leštění AlSi10, byly nejprve leštěny „zkušební“ vzorky z hliníkového plechu při různých parametrech nastavení. Jako elektrolyt byla užita koncentrovaná H_3PO_4 podle Gillespieho [45], která byla ohřáta na 70°C . Z výsledků byly vybrány vhodné parametry pro elektro-chemické leštění, viz. Tabulka 2.

Tabulka 2: Parametry pro elektro-chemické leštění AlSi10

Vzorek	Elektrolyt	Napětí [V]	Proud [A]	Teplota [°C]	Čas [min]
1	konc. H ₃ PO ₄	10	0,8	70	10
2	konc. H ₃ PO ₄	10	0,8	70	30
3	konc. H ₃ PO ₄	20	1,5	70	10
4	konc. H ₃ PO ₄	8	0,5	70	10
5	konc. H ₃ PO ₄	8	0,5	70	40

Všechny vzorky byly rovněž očištěny v ultrazvuku, jelikož během leštění vzorky byly ve statické poloze a nevykonávaly žádný pohyb pro odstranění odpadního materiálu. Sestava pro elektro-chemické leštění (Obrázek 14) se skládala z kádinky s elektrolytem, která byla ve vodní lázni, ohřívače STUART SD 160 (Příloha 4), teploměru a zdroje OWON P 4305 (Příloha 7), který umožňuje pracovní rozsah stejnosměrného napětí 0 – 30 V spolu s 0 – 5 A. Vzorek byl zapojen jako anoda a jako katoda posloužila klec z austenitické nerezové oceli.

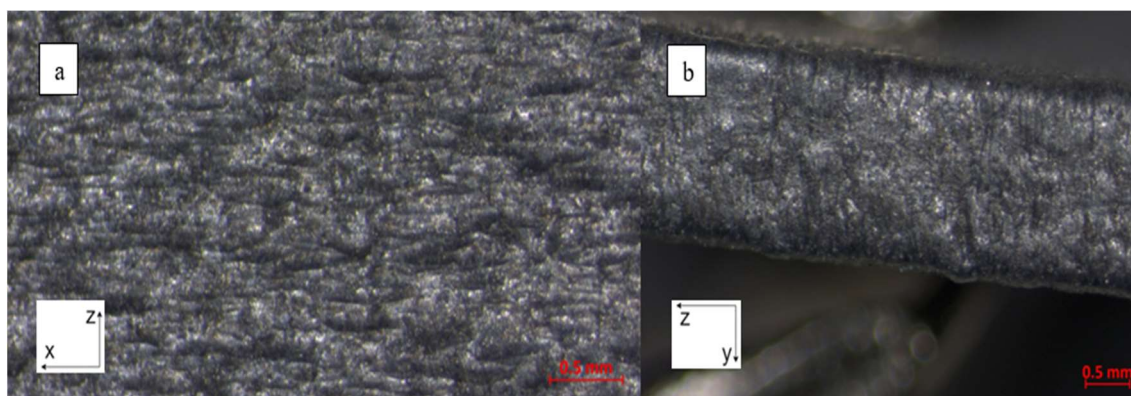


Obrázek 14: Schéma sestavy pro elektro-chemické leštění.

7 Výsledky experimentů

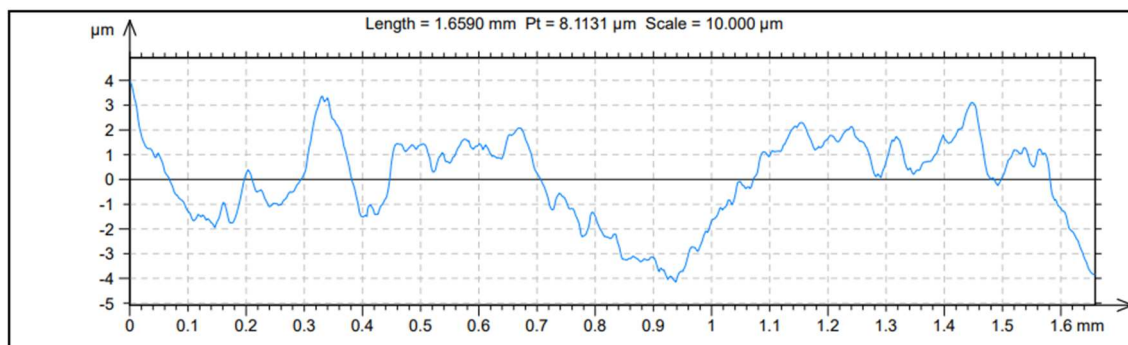
7.1 Původní stav

Výchozí stav před leštěním je zachycen na Obrázku 15 pomocí pozorování na stereolupě ZEISS Stemi 508 (Příloha 5). Je patrné, že povrch je velmi hrubý a také jdou pozorovat jednotlivé vrstvy, jak zmiňuje i teorie. Na povrchu je rovněž velké množství zrníček kovového prášku, které ulpěly na stěny vzorku. Můžeme předpokládat, že k dosažení přijatelného výsledku bude třeba velkého úběru materiálu, jelikož nerovnosti jsou značné.



Obrázek 15: Původní stav povrchu vzorku.

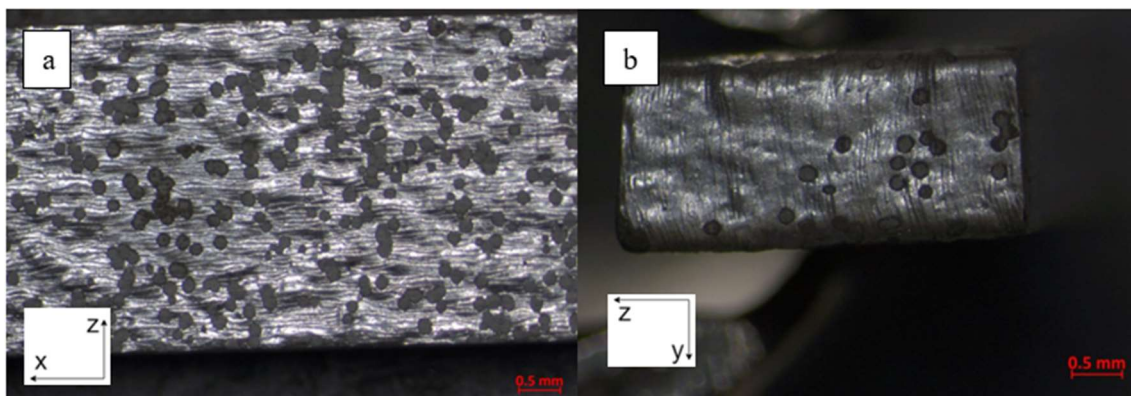
Drsnost byla měřena na přístroji Talysurf CCI. Výchozí povrch neleštěného vzorku má hodnotu parametru R_a rovnu $5,0 \mu\text{m}$ a hodnotu parametru R_z rovnu $32,5 \mu\text{m}$. Tyto hodnoty jsou způsobeny zejména neroztavenými zrníčky prášku, které byly přitaveny na povrchu během výroby.



Obrázek 16: Reliéf povrchu neleštěného vzorku (výchozí stav)

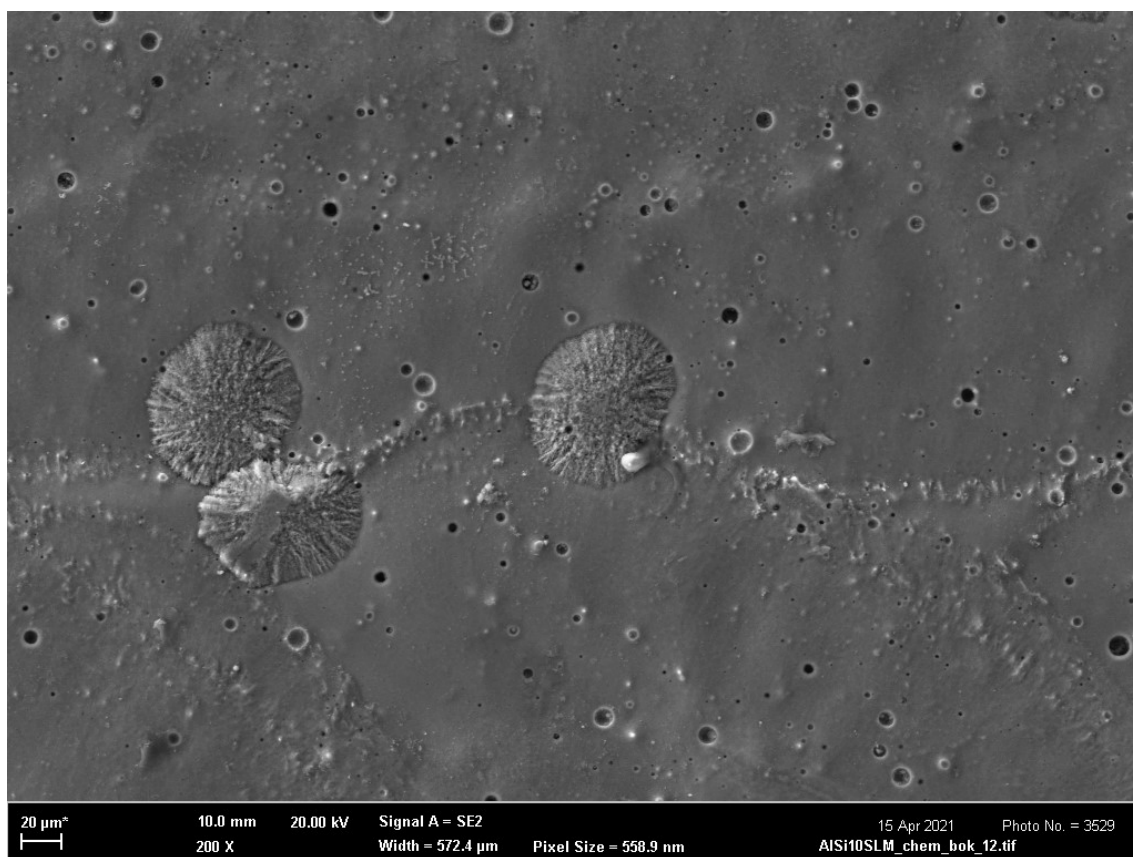
7.2 Chemické leptání

Chemické leptání bylo zvoleno za účelem „odrazového můstku“ pro navazující elektrochemické leštění. Výsledkem bylo dosažení lesklého povrchu, nicméně drsnost byla stále markantní, jelikož došlo pouze k odstranění nalepených zrníček prášku ze stran, které byly v kontaktu s nespečeným materiálem. Rozvrstvený povrch je stále markantní (Obrázek 17a), ale většího úbytku materiálu bylo dosaženo z boční strany (Obrázek 17b), kde můžeme pozorovat zlepšení drsnosti povrchu oproti výchozímu stavu.



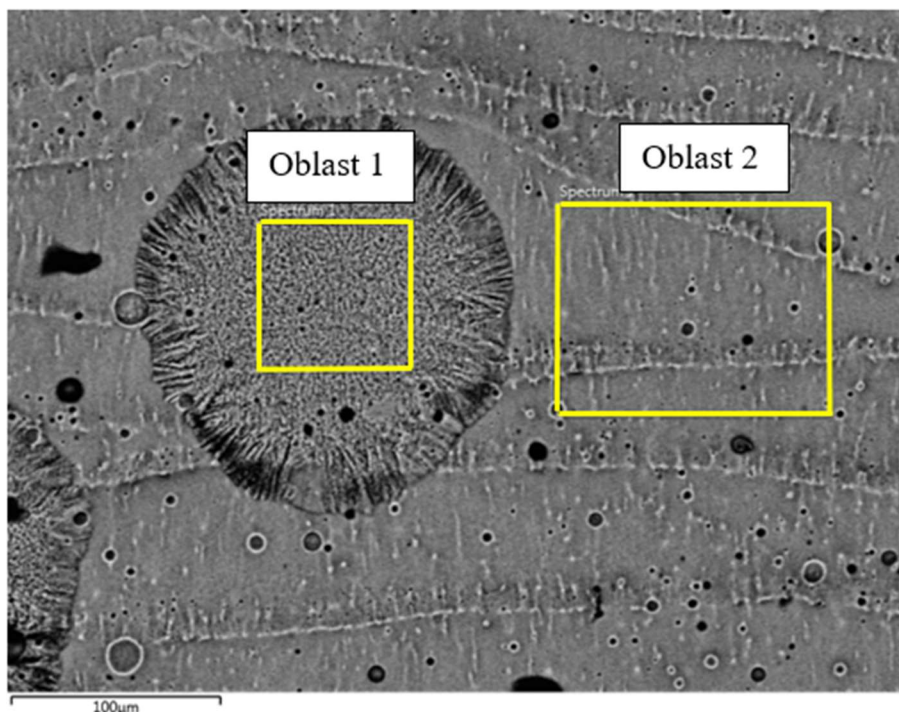
Obrázek 17: Povrch vzorku po chemickém leštění.

Jak je patrné z Obrázku 17, na povrchu za den po leptání vyvzlínaly malé kruhové útvary, které vystupovaly z povrchu ven. Pro lepší zobrazení částic byl vzorek pozorován pod rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM) ZEISS Ultra plus (Příloha 6).



Obrázek 18: Povrch chemicky leštěného vzorku pod SEM.

Následně byla provedena analýza dvou oblastí, viz. Obrázek 19, pro určení druhu neznámých částic. Díky porovnání hmotnostních procent (hm. %) jednotlivých prvků z oblasti 1 (Tabulka 3) a 2 (Tabulka 4) můžeme říci, že vyšetřované útvary jsou oxidy dané slitiny, jelikož hmotnostní procenta Al a Si se udržují zhruba při stejných hodnotách (90 hm. % Al, 10 hm. % Si) a v oblasti 1 je nepatrně větší množství kyslíku (1,6 hm. % O).



Obrázek 19: Oblasti analýzy částic.

Tabulka 3: Výsledky analýzy oblasti 1.

Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	1,59	0,19	2,66
Al	88,45	0,25	87,83
Si	9,97	0,19	9,51
Total:	100		100

Tabulka 4: Výsledky analýzy oblasti 2.

Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	0,7	0,17	1,18
Al	88,95	0,23	88,88
Si	10,36	0,17	9,94
Total:	100		100

7.3 Elektro-chemické leštění

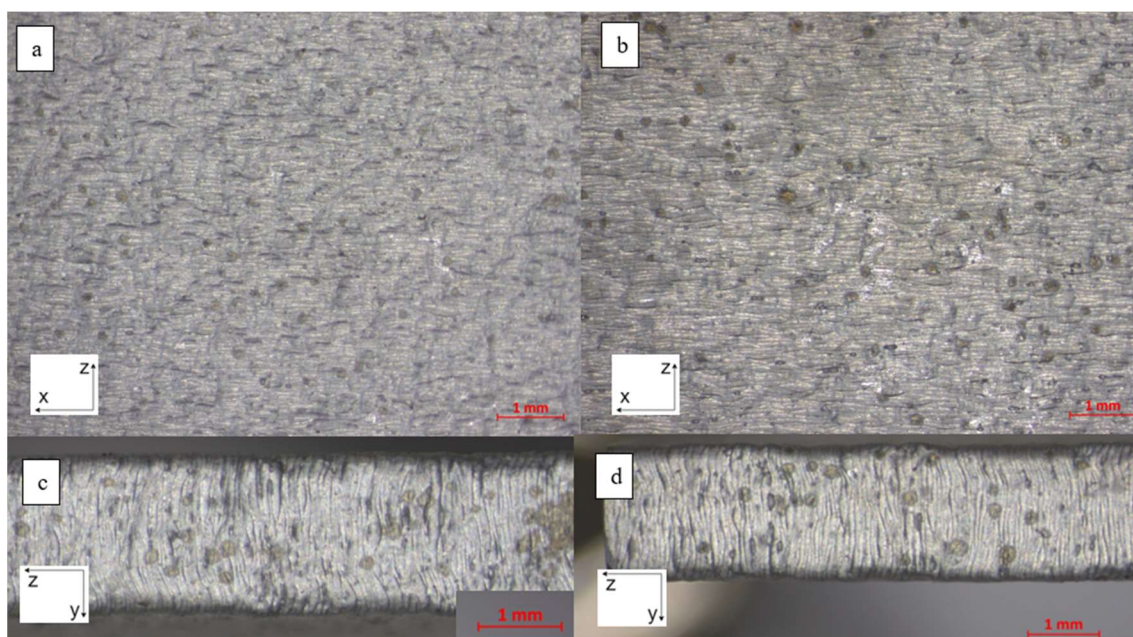
Úprava parametrů pro elektro-chemické leštění byla obtížná, jelikož nebylo možné určit křivku závislosti proudové hustoty na napětí. U všech vzorků po spuštění leštění začaly unikat bublinky z povrchu. To značilo vodivé propojení mezi anodou (vzorek) a katodou (klec) přes elektrolyt.

7.3.1 Vzorek 1 – 10 V, 0,8 A, 10 min

Vzorek 1 se leštil s parametry, které při testovacím leštění dopadly nejlépe. Výsledkem však byla naprosto nedostatečná změna drsnosti, kdy z povrchu byla odstraněna pouze většina ulpělých zrníček kovového prášku (Obrázek 20a a 20c).

7.3.2 Vzorek 2 – 10 V, 0,8 A, 30 min

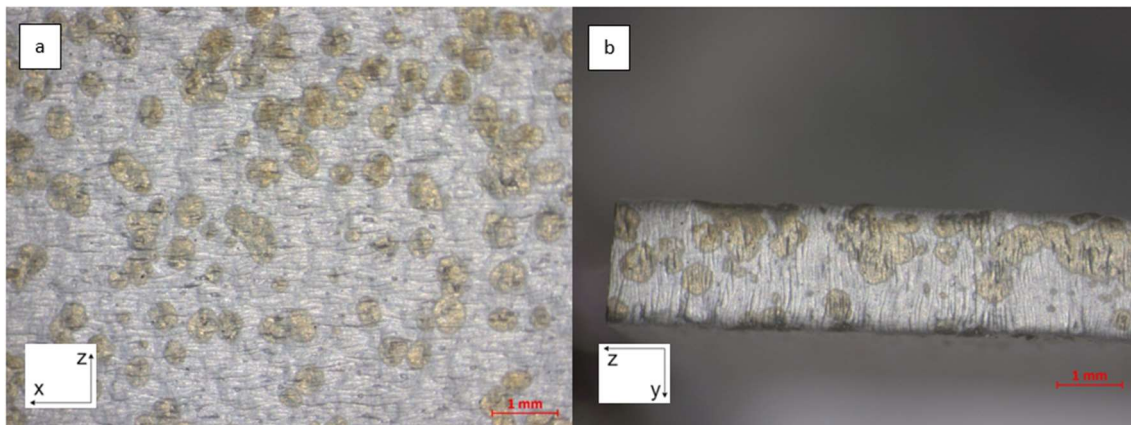
Doba leštění vzorku 2 byla prodloužena na 30 min, za účelem vyššího úběru materiálu, jelikož předchozí kratší čas (10 min) nepřinesl uspokojivé výsledky. Při porovnání se vzorkem 1, vzorek 2 (Obrázek 20b a 20d) naopak vykazuje o něco málo vyšší hrubost povrchu (došlo ke zvýraznění jednotlivých vrstev). V obou případech se na povrchu objevily nažloutlé skvrny, což patrně značí nějakou reakci elektrolytu se vzorkem.



Obrázek 20: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 10 V, 0,8 A a po dobu 10 min (a,c) a po dobu 30 min (b,d).

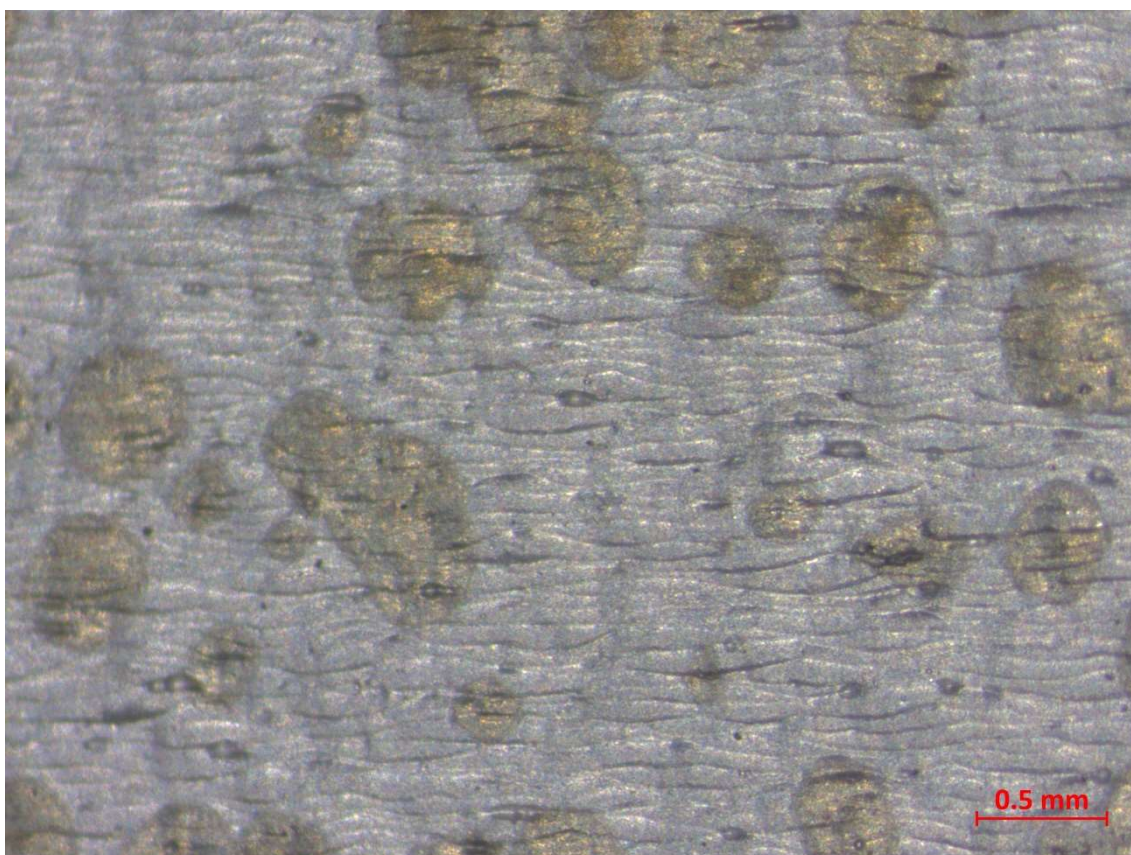
7.3.3 Vzorek 3 – 20 V, 1,5 A, 10 min

Kvůli nedostatečnému lesku jsme se domnívali, že byla zvolena nízká proudová hustota, proto byly parametry navýšeny na 20 V a 1,5 A (viz. vzorek 3). Povrch vzorku byl ale naopak spíše matný a stále byla zachována vysoká drsnost povrchu se zvýrazněnými vrstvami.



Obrázek 21: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 20 V a 1,5 A.

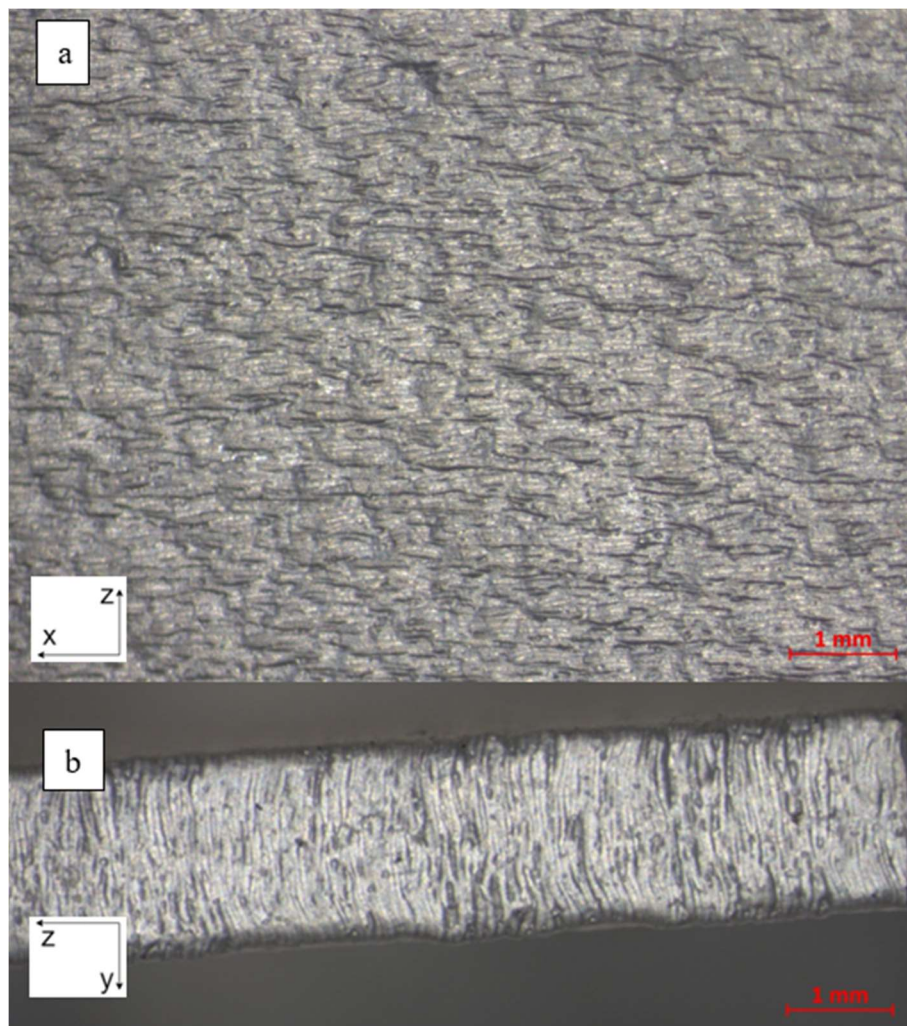
Také se zde objevují žluté skvrny, na kterých při větším přiblížení (Obrázek 22) je patrné, že nějak nevystupují z povrchu ven, ale kopírují daný reliéf povrchu. Nevíme, proč se tak děje, ale vzhledem k jejich velikosti, která je mnohem větší než velikost kovového prášku, můžeme předpokládat, že v nerovném povrchu zůstaly zbytky elektrolytu, který následně zreagoval s materiálem.



Obrázek 22: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 20 V a 1,5 A.

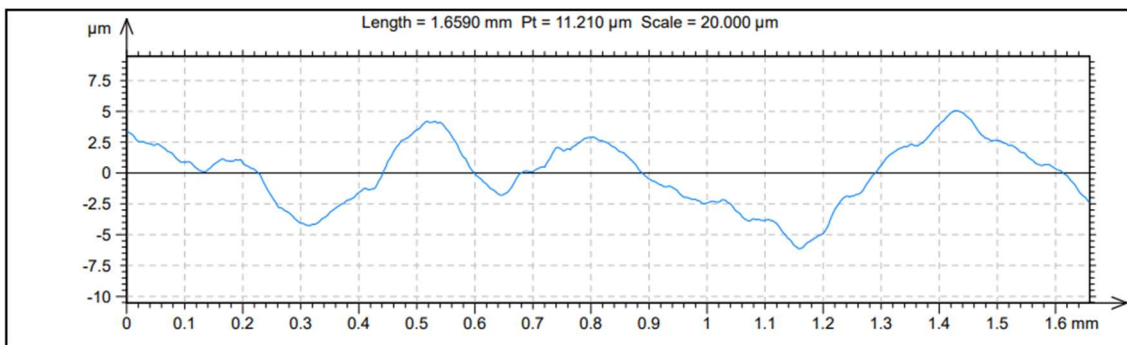
7.3.4 Vzorek 4 a 5 – 8 V, 0,5 A

Jelikož navýšení parametrů nevedlo k uspokojivým výsledkům, rozhodli jsme se naopak výrazně snížit parametry a to na hodnotu 8 V a 0,5 A (viz. vzorek 4 a 5). Elektro-chemické leštění dle výše uvedených parametrů po 10 min (vzorek 4) přinesl relativně lesklý povrch (Obrázek 23). Také při porovnání s výchozím stavem můžeme zaznamenat úbytek materiálu a mírného zhlazení nerovností.



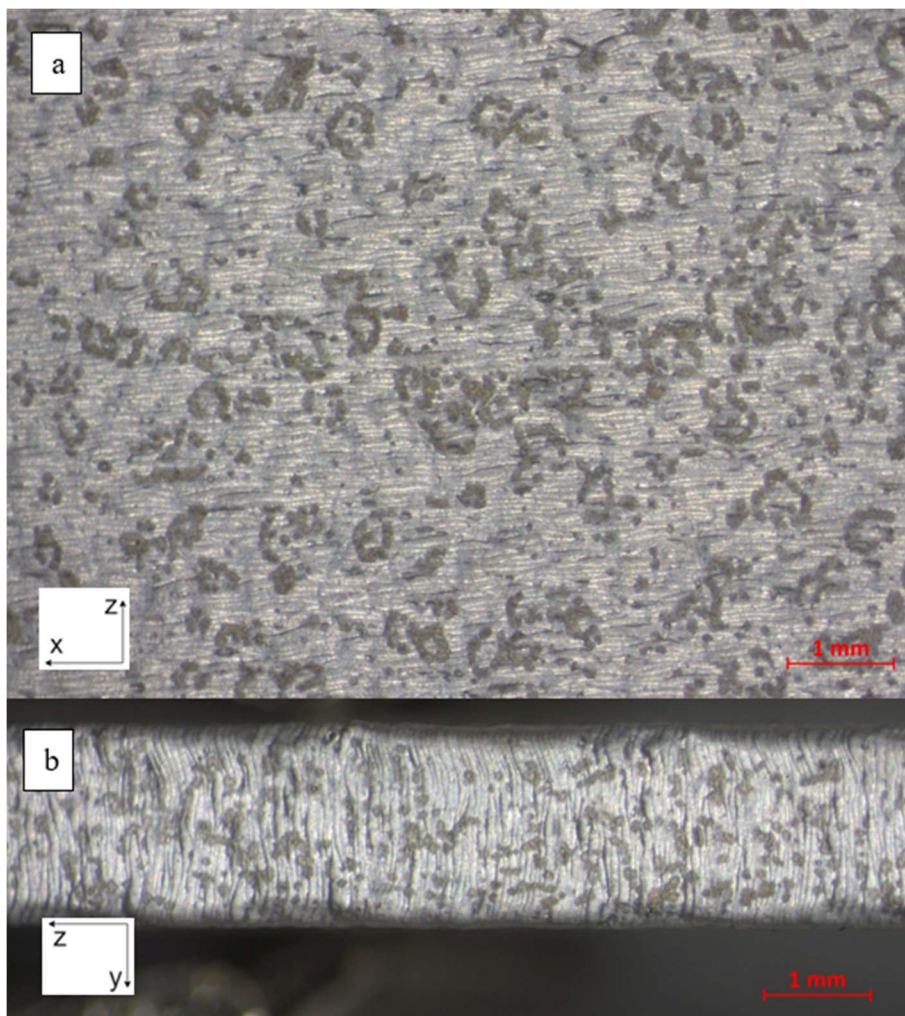
Obrázek 23: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 8 V, 0,5 A a po 10 min.

Hodnota parametru R_a byla u tohoto vzorku rovna $4,5 \mu\text{m}$ a parametr R_z dosahoval hodnoty $24,3 \mu\text{m}$, což představuje pouze minimální posun k lepším hodnotám, ale z estetického hlediska je materiál již příjemný na dotek, což je zapříčiněno díky odstranění hrubých nerovností (přítavené zrníčka prášku).



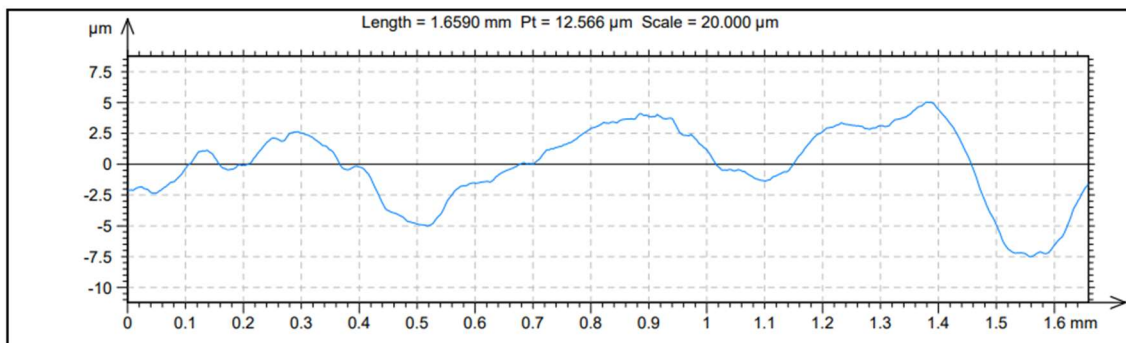
Obrázek 24: Reliéf povrchu leštěného vzorku při 8 V, 0,5 A a po 10 min.

Snížení drsnosti povrchu však bylo stále nedostatečné, a proto došlo k navýšení času leštění na 40 min (vzorek 5). Výsledný povrch měl nečekaný výsledek, jelikož se zde objevily důlky, jak je patrné na Obrázku 25. Ty lze zdůvodnit opět nějakou reakcí elektrolytu s materiálem. Nejedná se však o tzv. pitting, který se objevuje při elektro-chemickém leštění s nízkou proudovou hustotou, jelikož ten by se pravděpodobně projevil i u vzorku 4 a navíc tvary důlků nejsou kulovitého tvaru.



Obrázek 25: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 8 V, 0,5 A a po 40 min.

Zde parametr R_a dosahuje hodnoty $3,9\text{ }\mu\text{m}$ a $R_z\text{ }21,3\text{ }\mu\text{m}$. Z reliéfu povrchu je patrné, že bylo dosaženo snížení nerovnosti na mikrometrické úrovni, jelikož povrch je stále vlnitý, ale vlny jsou již relativně vyhlazeny.



Obrázek 26: Reliéf povrchu leštěného vzorku při 8 V, 0,5 A a po 40 min.

Pro lepší představu o lesku jednotlivých vzorků byl pořízen Obrázek 27 digitálním fotoaparátem NIKON Coolpix L830. Je patrné, že nejlepšího lesku dosahují vzorky 1 a 2 (10 V, 0,8 A) a vzorek 4 (8 V, 0,5 A, 10 min).



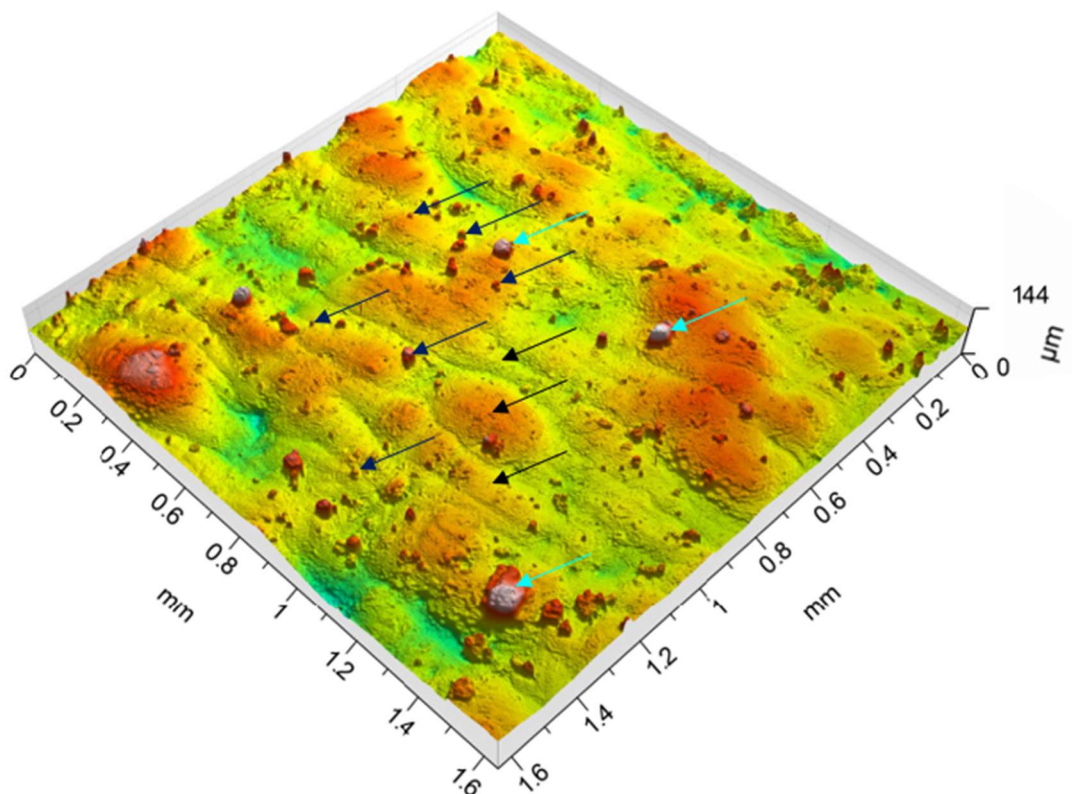
Obrázek 27: Porovnání lesku povrchu vzorků; zleva – neleštěný vzorek, vzorek 1 a 2 (10 V, 0,8 A), vzorek 3 (20 V, 1,5 A), vzorek 4 a 5 (8 V, 0,5 A).

8 Diskuze

Praktická část nám umožnila si ověřit teoretické základy z oblasti aditivní technologie a následně jsme mohli zhodnotit výsledky úprav povrchů SLM materiálu při různých nastaveních. V našem případě byl pozorován silumin AlSi10. I přes to, že se jedná o hliníkovou slitinu, která díky FCC mřížce hliníku zaručuje dobrou houževnatost, má cenu se zabývat snížením drsnosti povrchu, a tak eliminovat koncentrátoři napětí, jelikož jakýkoliv negativní stav povrchu ovlivňuje výsledné vlastnosti materiálu a způsobuje tak nežádoucí dopady na životnost a funkčnost budoucí součásti.

Výchozí stav velmi dobře vystihuje povahu aditivně vyrobeného materiálu, jelikož mikrostruktura je tvořena velmi drobnými zrny hliníku a eutektika (Al+Si) díky prudkému ochlazení po natavení laserem. Můžeme také říci, že pro lepší vlastnosti materiálu by bylo vhodné změnit nastavení tisku, neboť materiál obsahuje velké množství pórů, kdy jedním z důvodů výskytu těchto vad může být vysoká energie laserového paprsku.

Při bližším pozorování povrchu můžeme konstatovat, že výsledná drsnost SLM materiálu je výsledkem dvou dílčích nerovností, jak je možné pozorovat na Obrázku 28. Jedná se o přitavený materiál (nečistoty, neroztavená zrníčka prášku) na povrchu a nerovnosti způsobené jednotlivými vrstvami materiálu.



Obrázek 28: Povrch neleštěného vzorku (výchozí stav); přitavená zrníčka prášku (tmavě modrá šipka), vyšpláchnutý materiál (světle modrá šipka), jednotlivé vrstvy tisku (černá šipka).

8.1 Porovnání experimentů

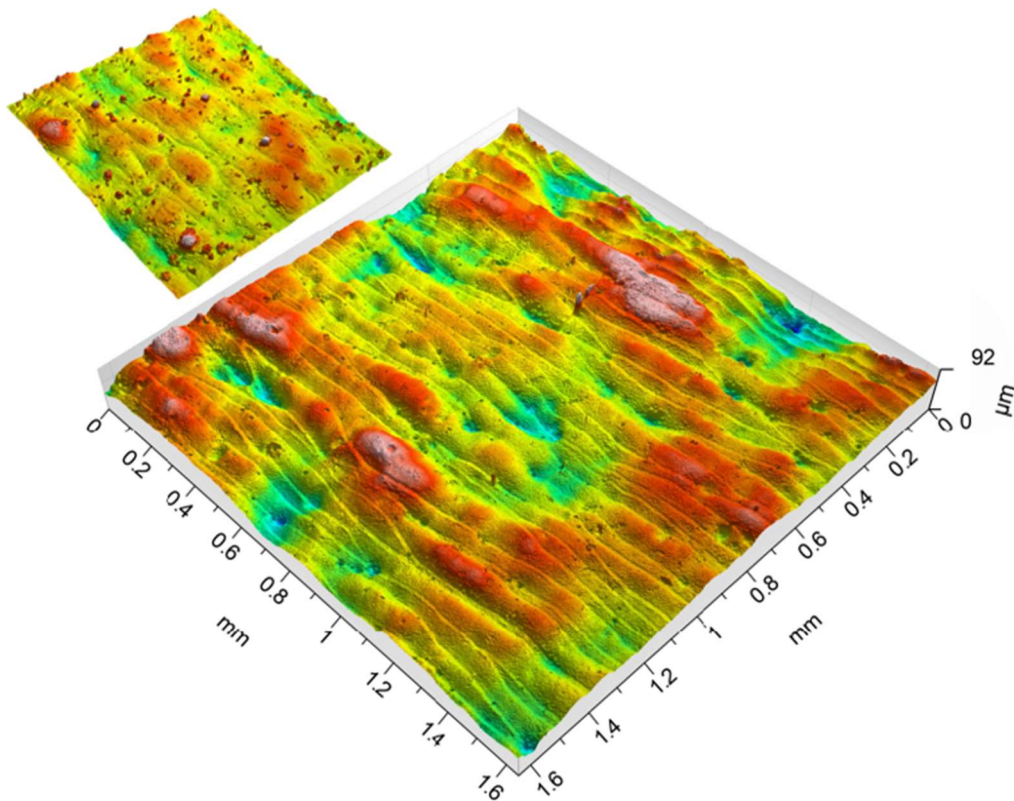
Odrazovým můstkem pro snížení drsnosti povrchu SLM materiálu (AlSi10) bylo chemické leštění podle Jindrové [44]. Ta ve své práci uvedla, že při leštění hliníkových plechů v ohřáté směsi koncentrované kyseliny fosforečné a dusičné v poměru 85:15 bylo dosaženo lesklého povrchu společně s odstraněním rýh po předchozím válcování. V našem případě šlo o nevhodný postup, jelikož bylo dosaženo minimálního úběru materiálu a následně se na povrchu objevily oxidy AlSi10.

U elektro-chemického leštění jsme vyšli z doporučených poznatků od Gillespieho [45] a zároveň bylo vyvozeno z předchozího chemického leštění, že vhodným elektrolytem bude kyselina v koncentrovaném stavu, jelikož pracujeme s odolným materiálem. Parametry jsou uvedeny v Tabulce 5.

Tabulka 5: Parametry pro elektro-chemické leštění AlSi10

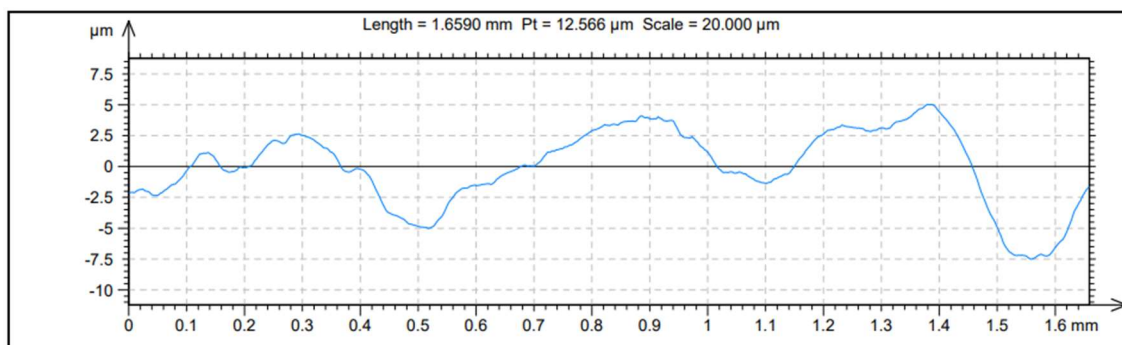
Vzorek	Elektrolyt	Napětí [V]	Proud [A]	Teplota [°C]	Čas [min]
1	konc. H ₃ PO ₄	10	0,8	70	10
2	konc. H ₃ PO ₄	10	0,8	70	30
3	konc. H ₃ PO ₄	20	1,5	70	10
4	konc. H ₃ PO ₄	8	0,5	70	10
5	konc. H ₃ PO ₄	8	0,5	70	40

Nejuspokojivějšími výsledky bylo leštění vzorku č. 4 a 5, tj. leštění při 8 V a 0,5 A. Na Obrázku 29 je znázorněné porovnání povrchu neleštěného vzorku a povrchu vzorku 4. Je patrné, že toto leštění odstranilo velké nečistoty a nastavení bylo dostačující na odstranění těchto relativně slabě vázaných nečistot. Parametr Ra se však změnil jen nepatrně. Poklesl z hodnoty 5 μm na 4,5 μm.

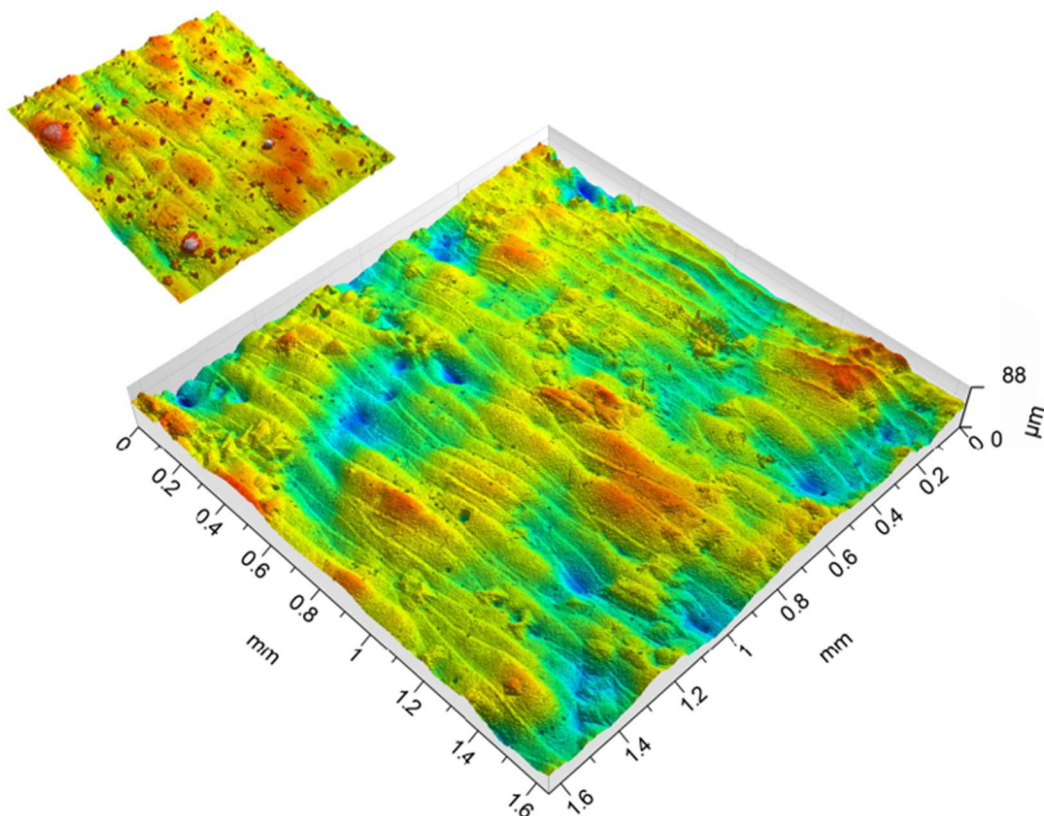


Obrázek 29: Srovnání povrchu vzorku 4 s neleštěným vzorkem (nahore).

Podle grafu na Obrázku 8, jenž byl publikován Pykou a kolektivem [14], při prodloužení doby leštění, by mělo dojít k většímu úběru materiálu a tudíž dosáhnout snížení drsnosti. Proto vzorek 5 měl stejné parametry leštění jako vzorek 4, pouze byla změněna doba leštění na 40 min. Zde hodnota parametru R_a klesla na $3,9 \mu\text{m}$. Z porovnání na Obrázku 31 můžeme vyčíst, že zde byl sice zaznamenán úběr materiálu, ale ten byl po celé ploše rovnoměrný, což má za následek vyhlazení drobných nerovností, ale výsledný povrch má zachovanou výraznou vlnitost. Tento fakt potvrzuje i znázorněný reliéf povrchu (Obrázek 30).



Obrázek 30: Reliéf povrchu leštěného vzorku při 8 V, 0,5 A a po 40 min.



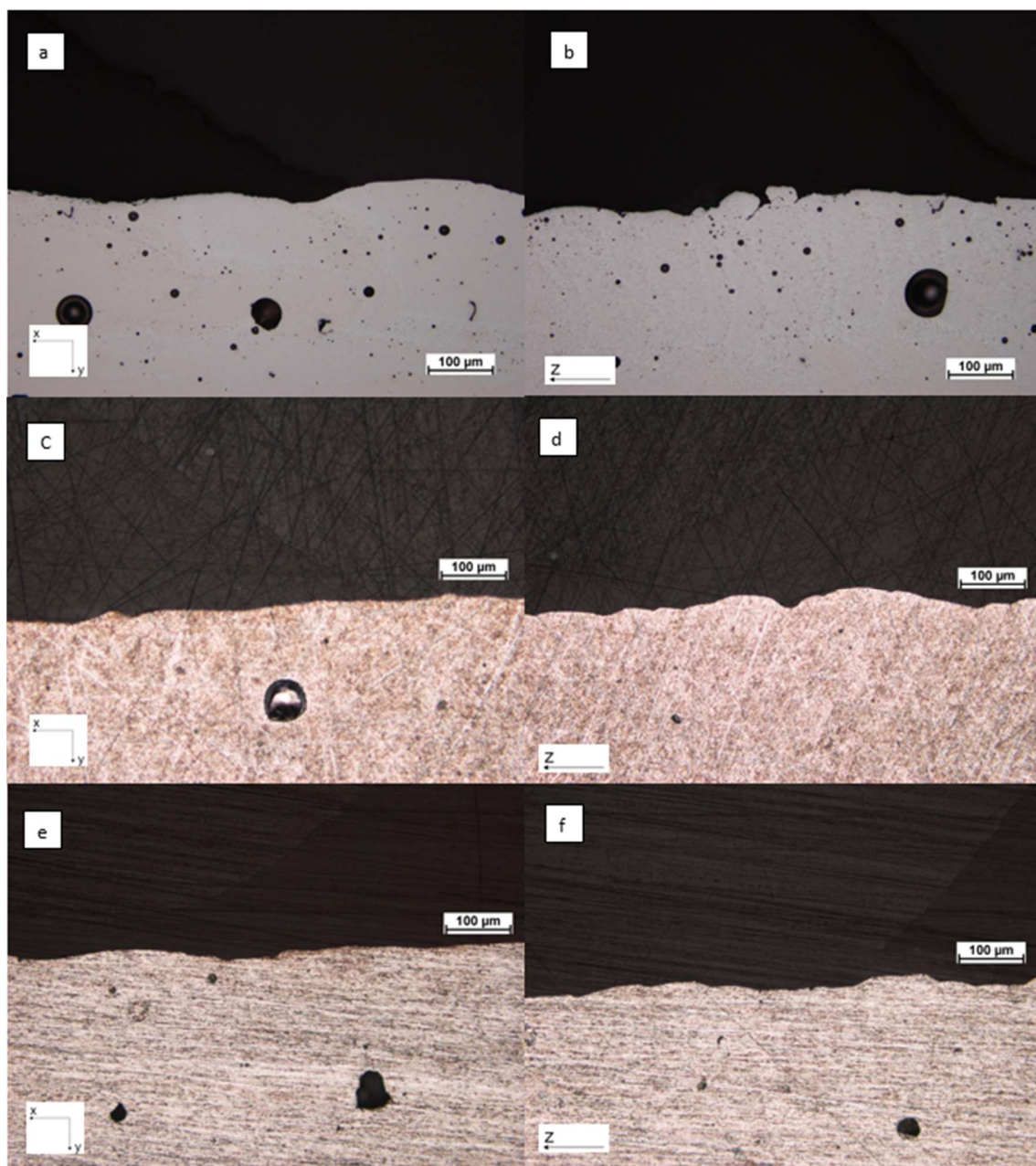
Obrázek 31: Srovnání povrchu vzorku 5 s neleštěným vzorkem (nahore).

Při shrnutí všech obdržených výsledků můžeme říci, že po elektro-chemickém leštění byly zaznamenány pozitivní změny na povrchu materiálu. Ze dvou výše popsaných zdrojů drsnosti se nám podařilo dobře odstranit z povrchu hrubé nečistoty, které představují zejména přitavená zrníčka kovového prášku. Při prodloužení doby leštění bylo dosaženo zahlazeného zvlněného povrchu, což představuje pozitivní trend v ovlivňování drsnosti povrchu.

Tyto změny jsou taktéž dobře patrné na Obrázku 32, kde je zobrazen vodorovný a svislý řez neleštěného vzorku a řezy vzorků 4 a 5 (leštění při 8 V a 0,5 A), které představují nejlepší výsledky ze všech pěti experimentů. Shrnutí všech elektro-chemicky leštěných vzorků je uvedeno v Tabulce 6, kde jsou uvedeny nejen hodnoty parametrů Ra a Rz, které byly naměřeny na neleštěném vzorku a vzorcích 4 a 5, ale také je zde zhodnocena estetická stránka povrchu materiálu.

Tabulka 6: Zhodnocení vzorků po elektro-chemickém leštění.

VZOREK	ZHODNOCENÍ	Lesk	Ra	Rz
neleštěný	na dotek drsný, velké množství nečistot na povrchu	žádný	5,0 μm	32,5 μm
1	minimální úběr materiálu, drsný na dotek, množství míst vhodných pro kumulaci nečistit při provozu	dobrý	-	-
2	srovnatelný se vzorkem 1	dobrý	-	-
3	na dotek hladší, výskyt žlutých skvrn	nedostatečný	-	-
4	při doteku hladký, z povrchu odstraněny velké nečistoty, zvýrazněny jednotlivé vrstvy	dobrý	4,5 μm	24,3 μm
5	hladký na dotek, zvlněný povrch bez velkých rozptylů	nedostatečný	3,9 μm	21,3 μm



Obrázek 32: Řez neleštěného vzorku (a, b), řez vzorku po elektro-chemickém leštění 8 V, 0,5 A a po 10 min (c,d) a po 40 min (e, f).

Z Obrázku 32 je také patrné, že vlnitost povrchu, které se nachází v rovině x-y (tj. vlnitost dané vrstvy), se změnila jen minimálně. Tento fakt lze odvodit už i z předchozího závěru, kdy bylo konstatováno, že úběr materiálu probíhal rovnoměrně po celém povrchu.

Jelikož veškerá literatura popisuje pouze obecné návody na elektro-chemické leštění hliníku, bylo by dobré pro další pozorování stanovit křivku závislosti proudové hustoty na napětí (např. dle Palmieriho [47]) pro námi zkoumaný materiál a zvolený elektrolyt, tj. pro koncentrovanou kyselinu fosforečnou, jelikož by tak bylo možné lépe určit parametry leštění a snáze je optimalizovat. Dále stojí za zvážení kombinace elektro-chemického leštění v kombinaci s chemickým leštěním, jak uvádí Pyka a kol. [14], jelikož taktéž pracovali s odolným SLM materiálem (Ti6Al4V) a můžeme tak předpokládat navýšení lesku, popřípadě větší úběr materiálu (snížení drsnosti).

9 Závěr

Úvodní část bakalářské práce se zabývala popisem aditivní výroby materiálů metodou SLM, kde byly také popsány základní vlastnosti těchto materiálů. Následně byly uvedeny nejpoužívanější materiály pro SLM technologii a jejich soudobé využití v praxi.

Druhá část shrnuje dosavadní výzkum v oblasti ovlivňování vlastností a úprav povrchu SLM materiálů. Práce byla zaměřena převážně na snížení drsnosti povrchu aditivně vyrobených materiálů, kdy dosavadní výzkum nastínil řešení, které by mělo být účinné bez ohledu na tvar a složitost budoucí součásti. Tímto řešením je elektro-chemické leštění, které umožňuje absenci abrazivního obrobění.

Praktická část se zabývala snížením drsnosti povrchu siluminu AlSi10 vyrobeného SLM metodou. Bohužel z pěti různých nastavení elektro-chemického leštění nebylo ani u jednoho dosaženo požadovaného úběru materiálu či dostatečného lesku. Nejlepší výsledek byl zaznamenán při 8 V, 0,5 A a po 40 min leštění, kdy z povrchu byl odstraněn jeden z činitelů vysoké drsnosti SLM materiálu a to přitavená zrníčka neroztaveného kovového prášku a přitavené nečistoty. Tím bylo dosaženo hladkého zvlněného povrchu, jehož hodnota parametru R_a byla snížena z 5,0 μm (neleštěný vzorek) na 3,9 μm .

Nastavení parametrů pro elektro-chemické leštění a následně jejich optimalizace byla obtížná, jelikož nebyla známa křivka závislosti proudové hustoty na napětí elektrolytu (konc. H_3PO_4) a pozorovaného siluminu. Navzdory tomu bylo dosaženo výsledků, které sice nejsou zcela uspokojivé, nicméně byl zaznamenán pozitivní trend v ovlivňování drsnosti povrchu.

Do budoucna je dobré se touto metodou úpravy povrchu aditivně vyráběných materiálů dále zabývat, jelikož mnohé takto vyrobené materiály nesplňují požadované vlastnosti a nemohou být tak plně užity v praxi.

10 Literatura

- [1] MILEWSKI, J. O. Additive Manufacturing of Metals. Cham: Springer International Publishing, 2017, 258. DOI: 10.1007/978-3-319-58205-4. ISBN 978-3-319-58204-7.
- [2] GIBSON, Ian, David W ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Boston, MA: Springer US, 2010. ISBN 9781441911193. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-1120-9
- [3] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. : il. ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [4] In: Advances in Production Technology [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015 [cit. 2021-04-01]. ISBN 978-3-319-12303-5. ISSN 2194-0533. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-12304-2
- [5] KEMPEN, Karolien, Evren YASA, Lore THIJS, Jean-pierre KRUTH a Jan VAN HUMBEECK. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. Physics Procedia [online]. 2011 [cit. 2021-4-28]. ISSN 1875-3892.
- [6] ATTAR, H, M CALIN, L.C ZHANG, S SCUDINO a J ECKERT. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing [online]. Elsevier B.V, 2014, 593, 170-177 [cit. 2021-04-01]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2013.11.038
- [7] FERRAR, B, L MULLEN, E JONES, R STAMP a C.J SUTCLIFFE. Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. Journal of materials processing technology [online]. Elsevier B.V, 2012, 212(2), 355-364 [cit. 2021-04-01]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.09.020
- [8] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. Acta materialia [online]. Elsevier, 2016, 117, 371-392 [cit. 2021-04-01]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019
- [9] KEMPEN, Karolien, Bey VRANCKEN, Lore THIJS, Sam BULS, Jan VAN HUMBEECK a Jean-pierre KRUTH. In: Lowering thermal gradients in Selective Laser melting by pre-heating the baseplate [online]. 2013 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay?docid=LIRIAS1748401&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&lang=en_US&fromSitemap=1
- [10] BENEDETTI, M., M. CAZZOLLI, V. FONTANARI and M. LEONI. Fatigue limit of Ti6Al4V alloy produced by Selective Laser Sintering. Procedia Structural Integrity [online]. Elsevier B.V, 2016, 2, 3158-3167 [cit. 2019-09-25]. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.394. ISSN 2452-3216.
- [11] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. Journal of materials processing technology [online]. Elsevier B.V, 2011, 211(2), 275-284 [cit. 2021-04-01]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019

- [12] SIMONELLI, Marco, Chris TUCK, Nesma T. ABOULKHAIR, Ian MASKERY, Ian ASHCROFT, Ricky D. WILDMAN a Richard HAGUE. A Study on the Laser Spatter and the Oxidation Reactions During Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V [online]. Springer, 2015, 46(9), 3842 [cit. 2021-04-01]. ISSN 1073-5623. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-015-2882-8
- [13] NASAB, Milad Hamidi, Dario GASTALDI, Nora Francesca LECIS a Maurizio VEDANI. On morphological surface features of the parts printed by selective laser melting (SLM). Additive manufacturing [online]. Elsevier B.V, 2018, 24, 373-377 [cit. 2021-04-01]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.10.011
- [14] PYKA, Grzegorz, Andrzej BURAKOWSKI, Greet KERCKHOFS, Maarten MOESEN, Simon VAN BAEL, Jan SCHROOTEN a Martine WEVERS. Surface Modification of Ti6Al4V Open Porous Structures Produced by Additive Manufacturing. Advanced Engineering Materials [online]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2012, 14(6), 363-370 [cit. 2021-04-01]. ISSN 1438-1656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201100344
- [15] YOUSSEF, Souhail; MAIRE, Eric; GAERTNER, Roger. Finite element modelling of the actual structure of cellular materials determined by X-ray tomography. Acta materialia, 2005, 53.3: 719-730. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2004.10.024
- [16] HOLLISTER, Scott J. Porous scaffold design for tissue engineering. Nature materials, 2005, 4.7: 518-524. Dostupné z: doi:10.1038/nmat1421
- [17] Používání chemických látek: v zemědělství, ve vodárenství, při povrchových úpravách materiálů, v čerpacích stanicích pohonných hmot. Vyd. 3. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, c2012. ISBN isbn978-80-87676-00-4.
- [18] ČÍHAL, Vladimír. Korozivzdorné oceli a slitiny. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 8020006710.
- [19] TAN, K.L a S.H YEO. Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing. Wear [online]. Elsevier B.V, 2017, 378-379(C), 90-95 [cit. 2021-04-06]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2017.02.030
- [20] HAOSHENG, Chen, Wang JIADAO a Chen DARONG. Cavitation damages on solid surfaces in suspensions containing spherical and irregular microparticles. Wear [online]. Elsevier B.V, 2009, 266(1-2), 345-348 [cit. 2021-04-06]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2008.05.010
- [21] GOHIL, Pankaj P a R.P SAINI. Coalesced effect of cavitation and silt erosion in hydro turbines—A review. Renewable & sustainable energy reviews [online]. Elsevier, 2014, 33, 280-289 [cit. 2021-04-06]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.01.075
- [22] ICHIDA, Y, R SATO, Y MORIMOTO a K KOBAYASHI. Material removal mechanisms in non-contact ultrasonic abrasive machining. Wear [online]. Elsevier B.V, 2005, 258(1), 107-114 [cit. 2021-04-06]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2004.05.016
- [23] ELEONORA, Atzeni. Abrasive fluidized bed finishing to improve the fatigue behaviour of Ti6Al4V parts fabricated by electron beam melting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. Heidelberg: Springer Nature B.V,

- 2020, 110(1-2), 557-567 [cit. 2021-04-08]. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-05814-9
- [24] ZHANG, Yaozhong, Shengyuan BAI, Mirko RIEDE, Elias GARRATT a Aljoscha ROCH. A comprehensive study on fused filament fabrication of Ti-6Al-4V structures. Additive manufacturing [online]. Elsevier B.V, 2020, 34 [cit. 2021-04-08]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101256
 - [25] KAROLEWSKA, Karolina, Bogdan LIGAJ, Dariusz BORÓŃSKI a Karolina KAROLEWSKA. Strain Analysis of Ti6Al4V Titanium Alloy Samples Using Digital Image Correlation. Materials (Basel, Switzerland) [online]. 2020, 13(15) [cit. 2021-04-08]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13153398
 - [26] KUMAR, Punit a Upadrasta RAMAMURTY. High cycle fatigue in selective laser melted Ti-6Al-4V. Acta materialia [online]. Elsevier, 2020, 194, 305-320 [cit. 2021-04-08]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2020.05.041
 - [27] SIMSKE, Steven J.; AYERS, REED A.; BATEMAN, T. A. Porous materials for bone engineering. In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 1997. p. 151-182. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/msf.250.151
 - [28] BADROSSAMAY, M a T.H.C CHILDS. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders. International journal of machine tools & manufacture [online]. Elsevier, 2007, 47(5), 779-784 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.09.013
 - [29] LEBRUN, Tyler, Takayuki NAKAMOTO, Keitaro HORIKAWA a Hidetoshi KOBAYASHI. Effect of retained austenite on subsequent thermal processing and resultant mechanical properties of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. Materials and Design [online]. Elsevier B.V, 2015, 81, 44 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2015.05.026
 - [30] MAZUMDER, J., J. CHOI, K. NAGARATHNAM, J. KOCH a D. HETZNER. The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components. JOM [online]. New York: Springer-Verlag, 1997, 49(5), 55-60 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/BF02914687
 - [31] CASALINO, G, S.L CAMPANELLI, N CONTUZZI a A.D LUDOVICO. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. Optics and laser technology [online]. Elsevier, 2015, 65, 151-158 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2014.07.021
 - [32] CAMPANELLI, Sabina. Manufacturing and characterization of similar to foam steel components processed through selective laser melting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. Heidelberg: Springer Nature B.V, 2017, 92(5-8), 2121-2130 [cit. 2021-04-09]. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-0311-4
 - [33] MURR, Lawrence E, Edwin MARTINEZ, Jennifer HERNANDEZ, Shane COLLINS, Krista N AMATO, Sara M GAYTAN a Patrick W SHINDO. Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. Journal of materials research and technology [online]. Elsevier Editora Ltda, 2012, 1(3), 167-177 [cit. 2021-04-09]. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:10.1016/S2238-7854(12)70029-7

- [34] BRICE, Craig, Ravi SHENOY, Milo KRAL a Karl BUCHANNAN. Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing* [online]. Elsevier B.V, 2015, 648, 9-14 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2015.08.088
- [35] BARTKOWIAK, Konrad, Sven ULLRICH, Thomas FRICK a Michael SCHMIDT. New Developments of Laser Processing Aluminium Alloys via Additive Manufacturing Technique. *Physics procedia* [online]. Elsevier B.V, 2011, 12(1), 393-401 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.050
- [36] VILARO, T., C. COLIN a J. BARTOUT. As-Fabricated and Heat-Treated Microstructures of the Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. Boston: Springer US, 2011, 42(10), 3190-3199 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1073-5623. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-011-0731-y
- [37] KOIKE, Mari, Preston GREER, Kelly OWEN, et al. Evaluation of Titanium Alloys Fabricated Using Rapid Prototyping Technologies-Electron Beam Melting and Laser Beam Melting. *Materials (Basel, Switzerland)* [online]. 2011, 4(10), 1776-1792 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma4101776
- [38] ZHANG, L.C, D KLEMM, J ECKERT, Y.L HAO a T.B SERCOMBE. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy. *Scripta materialia* [online]. Elsevier, 2011, 65(1), 21-24 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1359-6462. Dostupné z: doi:10.1016/j.scriptamat.2011.03.024
- [39] REN, Hai-shui, Xiang-jun TIAN, Dong LIU, Jian LIU a Hua-ming WANG. Microstructural evolution and mechanical properties of laser melting deposited Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. Elsevier, 2015, 25(6), 1856-1864 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1003-6326. Dostupné z: doi:10.1016/S1003-6326(15)63792-X
- [40] YADROITSEV, I, L THIVILLON, Ph BERTRAND a I SMUROV. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder. *Applied surface science* [online]. Elsevier B.V, 2007, 254(4), 980-983 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2007.08.046
- [41] QIU, Chunlei, Nicholas J.E ADKINS a Moataz M ATTALLAH. Selective laser melting of Invar 36: Microstructure and properties. *Acta materialia* [online]. Elsevier, 2016, 103, 382-395 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2015.10.020
- [42] VANDENBROUCKE, Ben a Jean-pierre KRUTH. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal* [online]. Emerald Group Publishing Limited, 2007, 13(4), 196-203 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552540710776142
- [43] THIJS, Lore, Frederik VERHAEGHE, Tom CRAEGHS, Jan Van HUMBEECK a Jean-pierre KRUTH. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta materialia* [online]. Elsevier, 2010, 58(9), 3303-3312 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2010.02.004

- [44] JINDROVÁ, Eva a Eva ŠŤASTNÁ. Příprava samoorganizovaných nanostrukturovaných oxidických vrstev. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014, 43 listů + 1 CD-ROM.
- [45] GILLESPIE, LaRoux K. DEBURRING and EDGE FINISHING HANDBOOK. United States of America: Society of Manufacturing Engineers, 1999. ISBN 0-87263-501-5.
- [46] LEE, Shuo-jen, Yu-ming LEE a Ming-feng DU. The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology. Journal of materials processing technology [online]. Elsevier B.V, 2003, 140(1-3), 280-286 [cit. 2021-5-3]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(03)00720-9
- [47] PALMIERI, V., et al. Fundamentals of electrochemistry-the electrolytic polishing of metals: Application to copper and Niobium. 2003.
- [48] BAGHERIFARD, Sara, Niccolò BERETTA, Stefano MONTI, Martina RICCIO, Michele BANDINI a Mario GUAGLIANO. On the fatigue strength enhancement of additive manufactured AlSi10Mg parts by mechanical and thermal post-processing. *Materials & design* [online]. Elsevier, 2018, **145**, 28-41 [cit. 2021-5-13]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.02.055
- [49] ZHAO, Chenhao, Ningsong QU a Xiaochuan TANG. Electrochemical mechanical polishing of internal holes created by selective laser melting. Journal of manufacturing processes [online]. Elsevier, 2021, 64, 1544-1562 [cit. 2021-5-13]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.03.003
- [50] Siemens reports successful full load tests of additively manufactured CM247 gas turbine blades. *Green Car Congress: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility* [online]. BioAge Group, 2017, 7. 2. 2017 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2017/02/20170207-siemens.html>
- [51] Poprawe, Reinhart & Hinke, Christian & Meiners, Wilhelm & Schrage, Johannes & Bremen, Sebastian & Merkt, Simon. (2015). SLM Production Systems: Recent Developments in Process Development, Machine Concepts and Component Design. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-12304-2_5.

11 Seznam použitých zkratek a symbolů

H₂SO₄ – kyselina sírová

HF – kyselina fluorovodíková

HNO₃ – kyselina dusičná

H₃PO₄ – kyselina fosforečná

HClO₄ – kyselina chloristá

H₂O – voda

CH₃COOH – kyselina octová

HCl – kyselina chlorovodíková

AlCu – slitina hliníku a mědi

AlSi12 – silumin (slitina hliníku a křemíku) se složením 12 hm. % Si a 88 hm. % Al

AlSi10Mg – slitina hliníku a křemíku (slitina obsahuje 10 hm. % Si) s příměsí hořčíku

AlSi10 – silumin (slitina hliníku a křemíku) se složením 10 hm. % Si a 90 hm. % Al

Ti6Al4V – titanová slitina s obsahem 6 hm. % Al, 4 hm. % V a 90 hm. % Ti

Ti24Nb4Zr8Sn – titanová slitina s obsahem 24 hm. % Ni, 4 hm. % Zr, 8 hm. % Sn a 64 hm. % Ti

Ti6,5Al3,5Mo1,5Zr0,3Si – titanová slitina s obsahem 6,5 hm. % Al, 3,5 hm. % Mo, 1,5 hm. % Zr, 0,3 hm. % Si a 88,2 hm. % Ti

AM – anglická zkratka (Additive Manufacturing) pro aditivní výrobu

SLM – anglická zkratka (Selective Laser Melting) pro druh aditivní výroby

DMLS – anglická zkratka (Direct Metal Laser Sintering) pro druh aditivní výroby

HIP – anglická zkratka (Hot Isostatic Pressing)

UCAF – anglická zkratka (Ultrasonic Cavitation Abrasive Finishing)

SEM – anglická zkratka (Scanning Electron Microscope) pro rastrovací elektronový mikroskop

hm. % – hmotnostní procento

obj. % – objemové procento

12 Seznam obrázků

- Obrázek 1: Neroztavené zrníčko kovového prášku uvnitř materiálu
Obrázek 2: Snímek z povrchu SLM vzorku
Obrázek 3: Turbínová lopatka z SLM niklové slitiny CM247
Obrázek 4: Topologicky upravený držák z SLM hliníkové slitiny
Obrázek 5: Změna mikrostruktury v závislosti na teplotě HIPování
Obrázek 6: Porovnání výsledků z únavové zkoušky HIPovaného a neHIPovaného vzorku
Obrázek 7: Vzorek s mikroprutovou strukturou
Obrázek 8: Naměřená drsnost povrchu po chemickém a elektro-chemickém leštění
Obrázek 9: Schéma metody UCAF
Obrázek 10: Snížení drsnosti v závislosti na čase u metody UCAF
Obrázek 11: Mikrostruktura SLM AlSi10, neleptaný stav.
Obrázek 12: Mikrostruktura SLM AlSi10, leptaný stav
Obrázek 13: Mikrostruktura SLM AlSi10, leptaný stav
Obrázek 14: Schéma sestavy pro elektro-chemické leštění
Obrázek 15: Původní stav povrchu vzorku
Obrázek 16: Reliéf povrchu neleštěného vzorku
Obrázek 17: Povrch vzorku po chemickém leštění
Obrázek 18: Povrch chemicky leštěného vzorku pod SEM
Obrázek 19: Oblasti analýzy částic
Obrázek 20: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 10 V, 0,8 A a po dobu 10 a 30 min
Obrázek 21: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 20 V a 1,5 A
Obrázek 22: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 20 V a 1,5 A
Obrázek 23: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 8 V, 0,5 A a po 10 min
Obrázek 24: Reliéf povrchu leštěného vzorku při 8 V, 0,5 A a po 10 min
Obrázek 25: Povrch vzorku po elektro-chemickém leštění při 8 V, 0,5 A a po 40 min
Obrázek 26: Reliéf povrchu leštěného vzorku při 8 V, 0,5 A a po 40 min
Obrázek 27: Porovnání lesku povrchu vzorků
Obrázek 28: Povrch neleštěného vzorku
Obrázek 29: Srovnání povrchu vzorku 4 s neleštěným vzorkem
Obrázek 30: Reliéf povrchu leštěného vzorku při 8 V, 0,5 A a po 40 min
Obrázek 31: Srovnání povrchu vzorku 5 s neleštěným vzorkem
Obrázek 32: Řez neleštěného vzorku a řezy vzorků 4 a 5

13 Seznam příloh

- Příloha 1 – SLM Solutions GmbH
- Příloha 2 – laboratorní řezačka ATA Brillant 220
- Příloha 3 – světelný mikroskop OLYMPUS – GX51
- Příloha 4 – ohřívač STUART – SD 160
- Příloha 5 – stereolupa ZEISS Stemi 508
- Příloha 6 – elektronový mikroskop ZEISS Ultra Plus
- Příloha 7 – zdroj OWON – P 4305

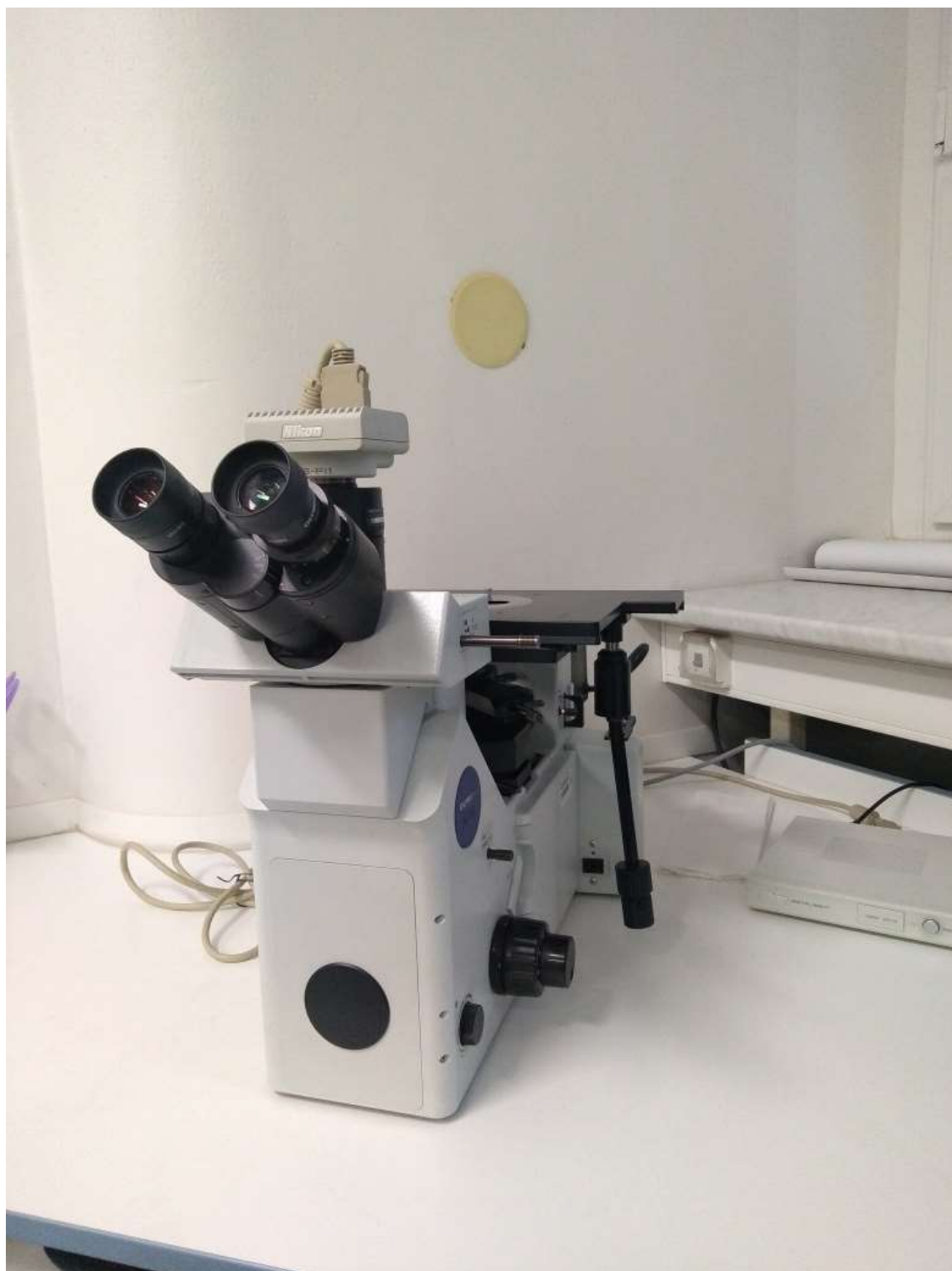
Příloha 1 – SLM Solutions GmbH



Příloha 2 – laboratorní řezačka ATA Brillant 220



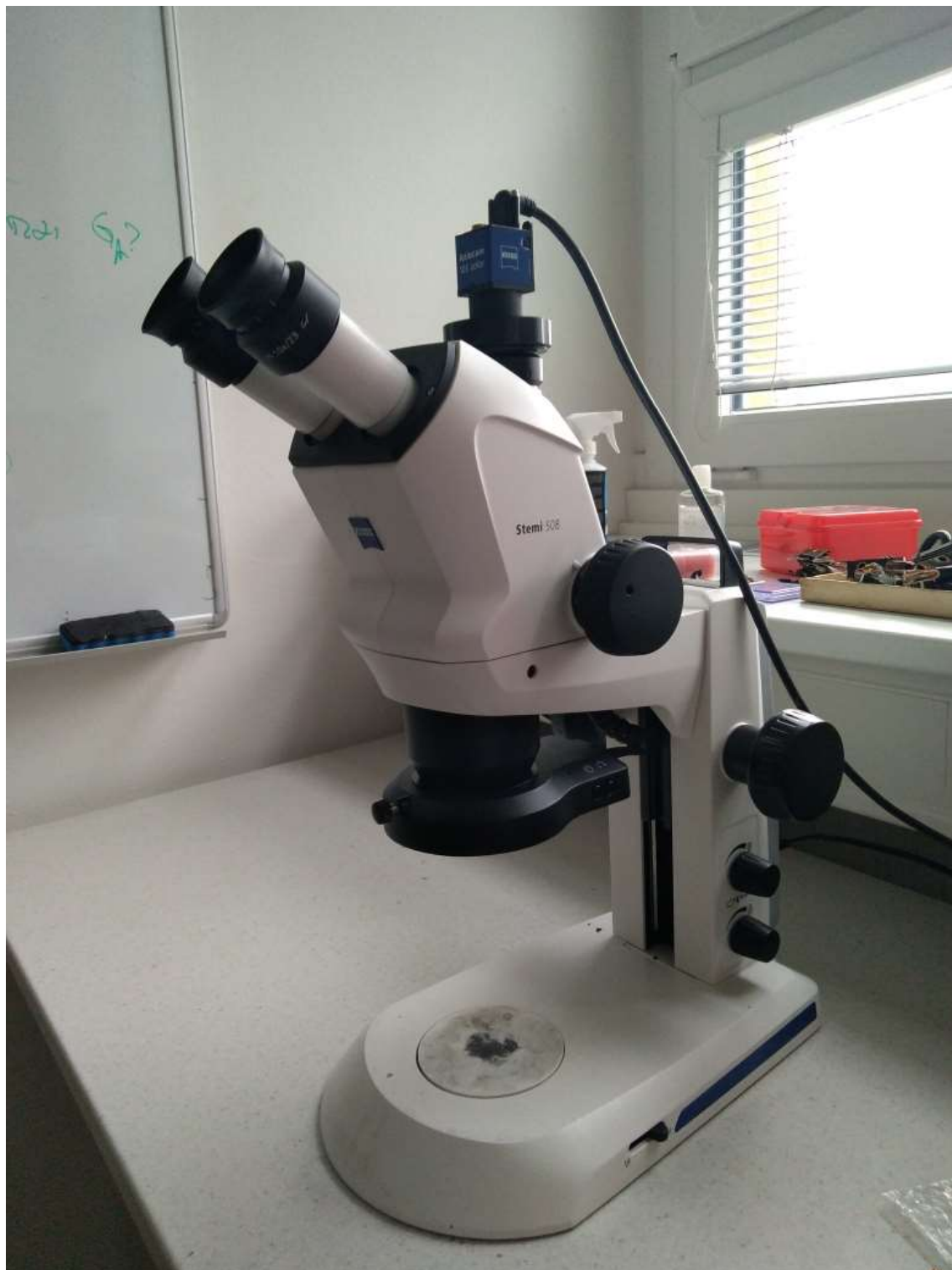
Příloha 3 – světelný mikroskop OLYMPUS – GX51



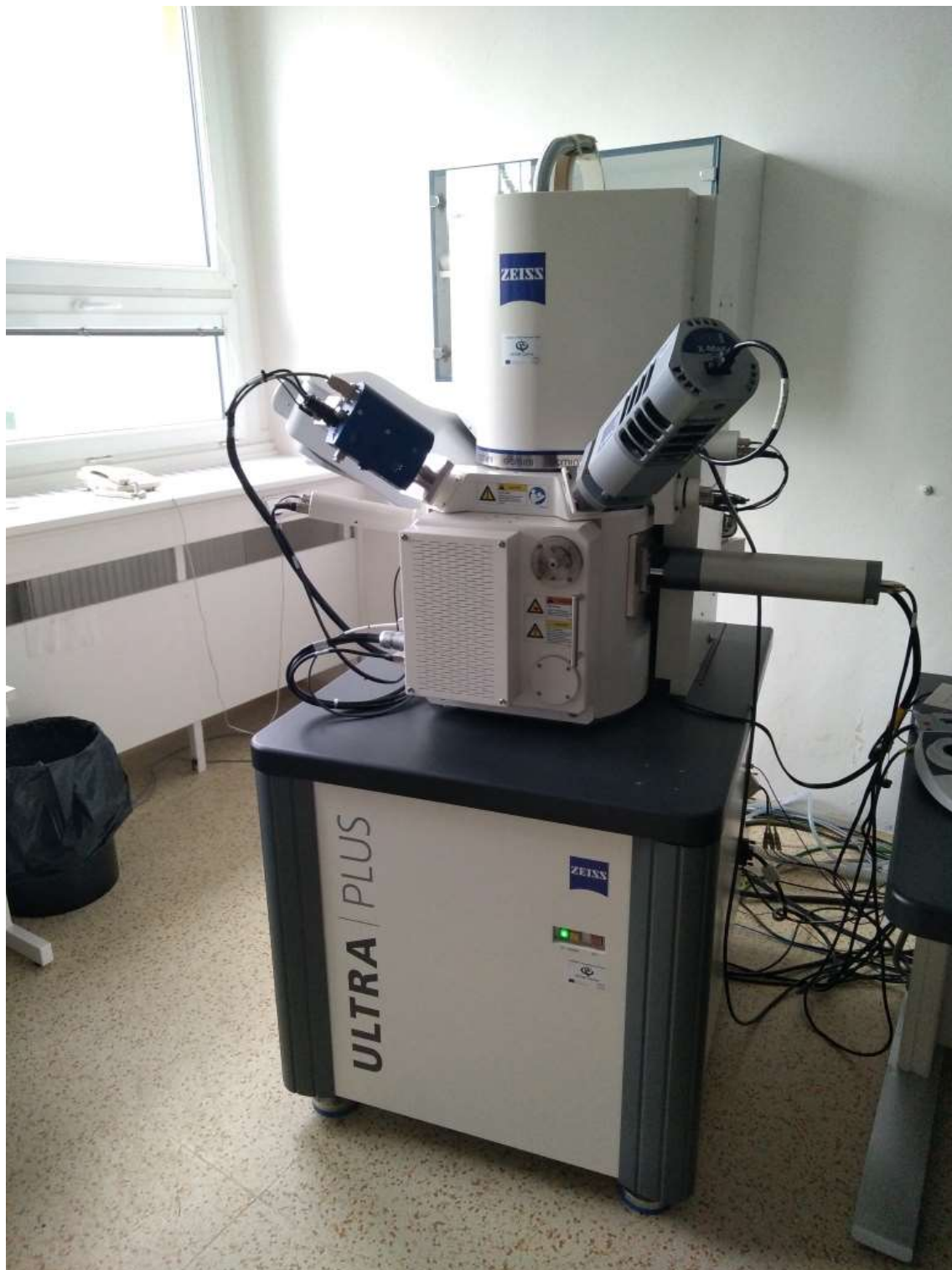
Příloha 4 – ohřívač STUART – SD 160



Příloha 5 – stereolupa ZEISS Stemi 508



Příloha 6 – elektronový mikroskop ZEISS Ultra Plus



Příloha 7 – zdroj OWON – P 4305

